



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH MODULU SYNCHRONNÍHO SPÍNANÉHO ZDROJE PRO AUTOMOBILY

DESIGN OF SYNCHRONOUS SWITCHED-MODE POWER SUPPLY FOR AUTOMOTIVE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Sedlák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Jakub Sedlák

ID: 183256

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh modulu synchronního spínaného zdroje pro automobily

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte literaturu týkající se synchronních DC-DC měničů se zaměřením na automobilový průmysl. Navrhněte synchronní DC-DC měnič pro automobilové osvětlení. Jeho parametry konzultujte s odborným vedoucím práce. V návrhu se zaměřte na optimalizaci ceny, EMC vlastností a teplotních poměrů. Simulací stanovte očekávaný vliv rozptylu hodnot součástek na vlastnosti modulu.

Navržený měnič kompletně realizujte. Provedte základní testy a měření navrženého vzorku dle požadavků automobilového průmyslu (teplotní ověření, EMC testy RE, CE a BCI). Naměřená data vyhodnoťte a uveďte možné způsoby optimalizace nebo modifikace navrženého měniče.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Pressman, A., Billings, K., Morey, T. Switching Power Supply Design. 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 2009. 848 p. ISBN: 978-0071482721.

[2] Williams, T. EMC for Product Designers, 4th Edition. Boston: Newnes, 2007. 512 p. ISBN: 978-0750681704

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

Konzultant: Ing. Pavel Huk



prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje problematice DC/DC měničů a jejich použití pro automobilové osvětlení. V první části je lehce rozvedena teorie DC/DC měničů, jejich základní topologie a synchronní usměrnění. Dále práce obsahuje porovnání vybraných integrovaných obvodů vhodných pro tuto aplikaci na základě požadovaných parametrů. Pro jeden z těchto obvodů je vytvořen návrh zapojení. Tento návrh byl ověřen simulací a následně realizován. Zařízení bylo otestováno podle norem automobilového průmyslu. Výsledkem je fungující měnič, který splňuje základní požadavky a limity dané normami.

KLÍČOVÁ SLOVA

DC/DC měnič, snižující měnič, synchronní snižující měnič, LM25141-Q1

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the DC/DC convertors and their application in automotive lighting. In first part of thesis, there are mentioned DC/DC convertors, their basic topologies and synchronous rectification. In next part of thesis, there are compared selected integrated circuits, which are suitable for this application. For one of these circuits is created a design. For this design was created a simulation to find out, that design is working. This design was realized and was tested according to automotive standards. In the end, there is a working DC/DC convertor, which meets requirements and basic limits from automotive standards.

KEYWORDS

DC/DC convertor, step – down, buck, synchronous buck, LM25141-Q1

SEDLÁK, J. *Návrh modulu synchronního spínaného zdroje pro automobily*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Kubíček, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma *Návrh modulu synchronního spínaného zdroje pro automobily* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Pavlu Hukovi, za vzorné vedení mé práce a za předané zkušenosti. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Kubíčkoví, PhD. za cenné rady.

OBSAH

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 DC/DC měniče	2
1.1 Rozdělení DC/DC měničů	2
1.2 Základní topologie měničů s cívkou	2
1.2.1 Snižující měnič (buck)	3
1.2.2 Zvyšující měnič (boost)	4
1.2.3 Invertující měnič	5
1.3 Synchronní snižující měnič	6
2 Porovnání řídicích obvodů	7
2.1 LMR23630-Q1	9
2.2 LM43603-Q1	10
2.3 NCV8851-1	11
2.4 LM25141-Q1	12
3 Návrh měniče	13
3.1 Výstupní cívka a odpor pro snímání proudu	13
3.2 Výstupní kondenzátor	16
3.3 Zpětnovazební smyčka a kompenzační pole	16
3.4 Nastavení spínací frekvence	18
3.5 Vstupní filtr	19
3.6 Vstupní ochrana	20
3.7 Spínací tranzistory a jejich řízení	22
4 Simulace	24
5 Návrh a výroba desky plošných spojů a její oživení	29
6 Měření	32
6.1 Ověření funkčnosti, základní charakteristika a účinnost zařízení	32

6.2	Vybrané testy inspirované normou	35
6.2.1	Test č.1 – odezva na skokovou změnu odebíraného proudu	35
6.2.2	Test č.2 - Odezva na změnu vstupního napětí 9 – 16 V	39
6.2.3	Test č.3 - Odezva na změnu vstupního napětí 13,5 – 27 V	41
6.2.4	Test č.4 – Vliv rušení o frekvencích 15 Hz – 30 kHz.....	43
6.2.5	Test č.5 – Vliv krátkodobého přerušení vstupního napětí	43
6.2.6	Test č.6 – Obrácení polarity vstupního napětí	47
6.2.7	Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení	48
6.3	Teplotní poměry na zařízení	50
6.4	Elektromagnetické emise	53
6.4.1	Rušení generované do vodiče	53
6.4.2	Rušení generované do okolí.....	56
7	Závěr	62
	Literatura	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Snižující měnič – sepnutý tranzistor [10].....	3
Obrázek 1.2 Snižující měnič – rozepnutý tranzistor [10]	3
Obrázek 1.3 Zvyšující měnič – sepnutý tranzistor [10].....	4
Obrázek 1.4 Zvyšující měnič – rozepnutý tranzistor [10]	4
Obrázek 1.5 Čukův měnič – rozepnutý tranzistor [10].....	5
Obrázek 1.6 Čukův měnič – sepnutý tranzistor [10]	5
Obrázek 1.7 Nesynchronní snižující měnič	6
Obrázek 1.8 Synchronní snižující měnič	6
Obrázek 2.1 Typické zapojení s konvertorem LMR23630-Q1 [4].....	9
Obrázek 2.2 Závislost účinnosti na výstupním proudu u konvertoru LMR23630-Q1 ($F_{SW} = 400 \text{ kHz}$, $V_{OUT} = 5 \text{ V}$) [4].....	9
Obrázek 2.3 Typické zapojení s konvertorem LM43603-Q1 [5]	10
Obrázek 2.4 Závislost účinnosti na výstupním proudu u konvertoru LM43603-Q1 ($F_{SW} = 500 \text{ kHz}$, $V_{OUT} = 5 \text{ V}$) [5].....	10
Obrázek 2.5 Typické zapojení s kontrolérem NCV8851-1 [6].....	11
Obrázek 2.6 Závislost účinnosti na odebíraném proudu u kontroléru NCV8851-1 ($F_{SW} = 170 \text{ kHz}$, $V_{OUT} = 5 \text{ V}$) [6].....	11
Obrázek 2.7 Typické zapojení s kontrolérem LM25141-Q1 [3]	12
Obrázek 3.1 Zapojení snímacího rezistoru[3].....	15
Obrázek 3.2 Zapojení odporového děliče ve zpětné vazbě [3].....	16
Obrázek 3.3 Tvar kmitočtové charakteristiky vytvořené pomocí kompenzačního pole	18
Obrázek 3.4 Tvar kmitočtové charakteristiky vytvořené kondenzátorem C_{COMP2}	18
Obrázek 3.5 Zapojení vstupního filtru [3]	19
Obrázek 3.6 Závislost špičkového výkonu, který je transil schopen pojmout, na šířce pulsu. [3]	21
Obrázek 3.7 Vstupní ochrana.....	21
Obrázek 3.8 Zapojení spínacích tranzistorů MOSFET [3]	23
Obrázek 4.1 Zapojení pro simulace obvodu	24
Obrázek 4.2 Očekávaná účinnost pro navržený měnič v závislosti na odebíraném proudu, oranžově je znázorněna účinnost pro vstupní napětí 7 V, zeleně pro 17 V a modře pro 27 V	25
Obrázek 4.3 Průběh výstupního napětí v závislosti na čase od připojení vstupního napětí	

17 V.....	25
Obrázek 4.4 Zvlnění výstupního napětí v ustáleném stavu	26
Obrázek 4.5 Skoková změna výstupního proudu z 3 A na 0,25 A a zpět.....	27
Obrázek 4.6 Reakce výstupního napětí na skokovou změnu výstupního proudu	27
Obrázek 4.7 Skoková změna vstupního napětí ze 7 V na 27 V a zpět	28
Obrázek 4.8 Reakce výstupního napětí na skokovou změnu vstupního napětí	28
Obrázek 5.1 Schéma zapojení navrženého měniče.....	29
Obrázek 5.2 Návrh desky plošných spojů – horní strana	30
Obrázek 5.3 Návrh desky plošných spojů – spodní strana	30
Obrázek 5.4 Osazená deska plošných spojů	31
Obrázek 6.1 Ověření funkce měniče při odebírání proudu 1,5 A, zelenou barvou je znázorněn průběh vstupního, fialovou barvou je znázorněn průběh vstupního proudu, žlutou barvou je znázorněno výstupní napětí a červenou barvou je znázorněn výstupní proud	33
Obrázek 6.2 Ověření funkce měniče při odebírání proudu 3 A, fialovou barvou je znázorněn průběh vstupního proudu, žlutou barvou je znázorněno výstupní napětí a červenou barvou je znázorněn výstupní proud	33
Obrázek 6.3 Závislost výstupního napětí na vstupním napětí pro různé proudy.....	34
Obrázek 6.4 Závislost účinnosti na vstupním napětí	35
Obrázek 6.5 Test č.1 – změna nahoru, 9 V, Výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.	36
Obrázek 6.6 Test č.1 – změna dolů, 9 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.	36
Obrázek 6.7 Test č.1 – změna nahoru, 13,5 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.	37
Obrázek 6.8 Test č.1 – změna dolů, 13,5 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.	37
Obrázek 6.9 Test č.1 – změna nahoru, 16 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.	38
Obrázek 6.10 Test č.1 – změna dolů, 16 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.	38
Obrázek 6.11 Test č.2 – změna nahoru, 1,5 A, Výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným,	

	vstupní proud fialovým	39
Obrázek 6.12	Test č.2 – změna dolů, 1,5 A, Výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	39
Obrázek 6.13	Test č.2 – změna nahoru, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	40
Obrázek 6.14	Test č.2 – změna dolů, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	40
Obrázek 6.15	Test č.3 – změna nahoru, 1,5 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	41
Obrázek 6.16	Test č.3 – změna dolů, 1,5 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	41
Obrázek 6.17	Test č.3 – změna nahoru, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	42
Obrázek 6.18	Test č.3 – změna dolů, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	42
Obrázek 6.19	Test č.4 – Vliv rušení na výstupní napětí, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým	43
Obrázek 6.20	Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 10 μ s, Výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje k měniči.....	44
Obrázek 6.21	Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 100 μ s, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje k měniči.....	44
Obrázek 6.22	Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 1 ms, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje.	45
Obrázek 6.23	Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 10 ms, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní	

napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje k měniči.....	45
Obrázek 6.24 Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 100 ms, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje k měniči.....	46
Obrázek 6.25 Test č.6 – Obrácení polarity vstupního napětí, žlutý průběh znázorňuje vstupní napětí, červený znázorňuje výstupní proud, fialový znázorňuje vstupní proud.	47
Obrázek 6.26 Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení, žlutý průběh znázorňuje napětí na pinu RES, zelený průběh napětí na pinu SS, červený průběh znázorňuje výstupní proud, fialový průběh znázorňuje vstupní proud.	48
Obrázek 6.27 Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení, 32 cyklů, žlutý průběh znázorňuje napětí na pinu RES, zelený průběh napětí na pinu SS, červený průběh znázorňuje výstupní proud, fialový průběh znázorňuje vstupní proud...	49
Obrázek 6.28 Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení, 512 cyklů, žlutý průběh znázorňuje napětí na pinu RES, zelený průběh napětí na pinu SS, červený průběh znázorňuje výstupní proud, fialový průběh znázorňuje vstupní proud...	49
Obrázek 6.29 Vzorek připravený pro měření teplotních poměrů	50
Obrázek 6.30 Celá deska při napětí 9 V	50
Obrázek 6.31 Celá deska při napětí 16 V	50
Obrázek 6.32 Cívka při napětí 9 V	51
Obrázek 6.33 Cívka při napětí 16 V	51
Obrázek 6.34 Horní MOSFET při napětí 9 V.....	51
Obrázek 6.35 Horní MOSFET při napětí 16 V.....	51
Obrázek 6.36 Dolní MOSFET při napětí 9 V.....	51
Obrázek 6.37 Dolní MOSFET při napětí 16 V.....	51
Obrázek 6.38 IO při napětí 9 V.....	52
Obrázek 6.39 IO při napětí 16 V.....	52
Obrázek 6.41 Zapojení pro měření rušení generovaného do vodiče	53
Obrázek 6.42 Měření rušení do vodiče na kladné vstupní svorce v rozsahu 100 kHz – 30 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná úroveň.....	54
Obrázek 6.43 Měření rušení do vodiče na kladné vstupní svorce v rozsahu 30 MHz – 108 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná úroveň.....	54
Obrázek 6.44 Měření rušení do vodiče na záporné vstupní svorce v rozsahu 100 kHz – 30 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity,	

zeleně je znázorněna průměrná úroveň.....	55
Obrázek 6.45 Měření rušení do vodiče na záporné vstupní svorce v rozsahu 30 MHz – 108 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná úroveň.....	55
Obrázek 6.46 Nastavení měřicího stanoviště pro měření s prutovou	56
Obrázek 6.47 Měření rušení do okolí v rozsahu 9 kHz – 150 kHz, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity.....	57
Obrázek 6.48 Měření rušení do okolí v rozsahu 100 kHz – 30 MHz, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity, černě kvazišpičková hodnota elektrické intenzity.....	57
Obrázek 6.49 Nastavení měřicího stanoviště pro měření s biconickou anténou	58
Obrázek 6.50 Měření rušení do okolí v rozsahu 30 MHz – 200 MHz v horizontální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity .	59
Obrázek 6.51 Měření rušení do okolí v rozsahu 30 MHz – 200 MHz ve vertikální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity .	59
Obrázek 6.52 Nastavení měřicího stanoviště pro měření s logaritmicko-periodickou anténou.....	60
Obrázek 6.53 Měření rušení do okolí v rozsahu 200 MHz – 1 GHz v horizontální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity	60
Obrázek 6.54 Měření rušení do okolí v rozsahu 200 MHz – 1 GHz ve vertikální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Požadované parametry navrhovaného měniče.....	7
Tabulka 2.2 Základní parametry čtyř vybraných obvodů [3][4][5][6]	8
Tabulka 3.1 Požadované parametry navrhovaného měniče.....	13
Tabulka 3.2 Porovnání parametrů tranzistorů NVMFS5C682NL a NVMFS5C670NL [7][8]	22
Tabulka 6.1 Ohřev výkonových součástek	52
Tabulka 6.2 Základní limity pro CE dané normou TL-81000	53
Tabulka 6.3 Základní limity pro RE dané normou TL-81000	56

ÚVOD

V dnešní době už není použití svítivých diod v automobilovém průmyslu nic neobvyklého. Diody převyšují klasické žárovky jak ve svítivosti, tak v účinnosti a životnosti. Na osvětlení jsou ale kladeny přísnější požadavky. Důraz je kladen na udržení konstantního proudu, i když nastane kolísání v napájecí síti automobilu, které může být způsobeno například startováním motoru. Proto se používají DC/DC měniče, které i z širšího rozsahu vstupního napětí dokáží stále produkovat konstantní napětí nebo proud s minimálním zvlněním.

Úkolem této práce je právě takový měnič navrhnout. Měnič musí být vhodný pro použití v automobilovém průmyslu, tudíž musí plnit přísnější normy, co se týče elektromagnetické kompatibility, musí být dostatečně odolný vůči změnám teplot a v neposlední řadě musí být spolehlivý.

V první části práce je rozebrána teorie DC/DC měničů, synchronního usměrňování a použití v automobilovém průmyslu. V druhé části je popsáno porovnání čtyř integrovaných obvodů pro řešení tohoto měniče. Porovnání zahrnuje informace, jestli jsou obvody schopny dosáhnout základních parametrů, které musí výsledný měnič splňovat a jestli jsou vhodné pro použití v automobilovém průmyslu. V třetí části je proveden návrh zapojení měniče s obvodem vybraným z porovnání v předchozí kapitole. Ve čtvrté části jsou provedeny simulace navrženého obvodu. V páté části je proveden kompletní návrh desky plošných spojů a popsáno oživení vyrobeného zařízení. V poslední části práce jsou zaznamenána měření na tomto zařízení. Jsou tu zobrazeny základní charakteristiky, účinnost měniče, testy inspirované normou, měření teplotních poměrů na desce a měření emisí rušivého záření, jak do napájecího vodiče, tak do okolí.

Na závěr je zhodnocena funkčnost zařízení, výsledky měření a možnost optimalizace měniče.

1 DC/DC MĚNIČE

DC/DC měnič je zařízení, které nám ze vstupního stejnosměrného napětí či proudu udělá požadované výstupní stejnosměrné napětí či proud. V dnešní době jsou DC/DC měniče nepostradatelnou součástí téměř každého elektrického zařízení. S výjimkou nejjednodušších bateriových přístrojů potřebují elektrická zařízení nějaký druh konverze napětí či proudu. Často vyžadují napájení hodnotami napájecího napětí, které se liší od napětí zdrojů, jak stejnosměrných (baterie, akumulátory), tak i síťových. [1]

1.1 Rozdělení DC/DC měničů

Základní dělení DC/DC měničů je na lineární a spínané regulátory. Výhodou lineárních regulátorů je jednoduchost, nižší cena, nižší zvlnění výstupního napětí a nižší rušení. Uplatní se především při regulaci, kde rozdíl vstupního a výstupního napětí je malý. Jejich účinnost je dána právě poměrem výstupního a vstupního napětí (pokud je vstupní proud a výstupní přibližně stejný). S klesající účinností pak rostou tepelné ztráty. Hlavní nevýhodou těchto regulátorů je neschopnost zvýšit hodnotu výstupního napětí nad hodnotu vstupního napětí. Proto se vyvinuly spínané regulátory, které dosahují vyšší účinnosti a mohou vstupní napětí i zvýšit. Jsou ovšem složitější na návrh, dražší a vlivem spínání na nich vzniká rušení. Spínané regulátory se dále dělí na měniče se spínanými kondenzátory, neizolované měniče a měniče izolované, které se používají, pokud je zapotřebí galvanicky oddělit výstupní napětí od vstupního napětí. Tyto měniče se pak dále dělí na jednočinné (akumulující měnič – flyback, propustný měnič – forward, rezonanční obvod) a dvojčinné (měnič v zapojení push-pull, měnič v zapojení polomost, měnič v zapojení plný most).[1]

Vzhledem k tomu, že měniče se spínanými kondenzátory se používají při malých výkonových zatíženích a izolované měniče obsahují galvanické oddělení, které je při akumulátorovém napájení nepotřebné, budou dále rozebírány neizolované, které jsou vhodné pro aplikaci v této práci.

1.2 Základní topologie měničů s cívkou

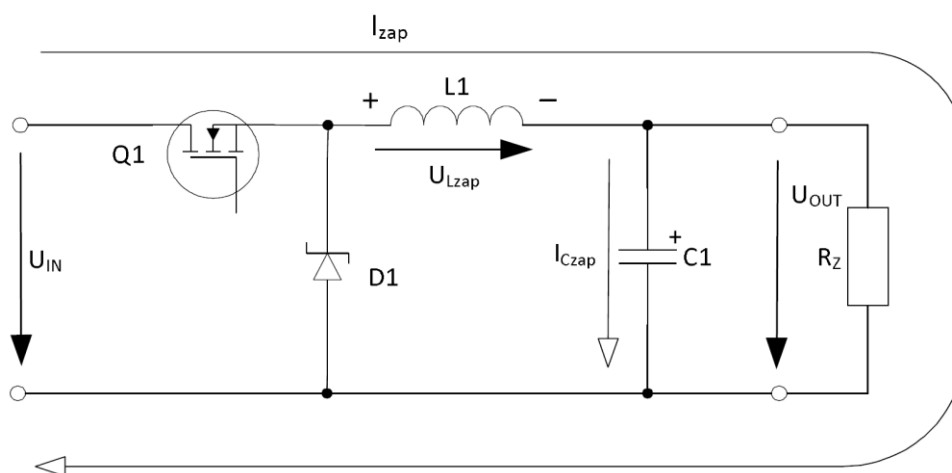
Základní zapojení měničů s cívkou jsou: snižující měnič (step – down, buck), zvyšující měnič (step – up, boost), invertující měnič. Jejich činnost je rozdělena do dvou částí – když spínací tranzistor sepnut a když je rozepnut. Spínání tranzistoru je prováděno pomocí pulsního signálu přiváděného na jeho hradlo. Frekvence spínání se mění podle požadavků na měnič. S rostoucí frekvencí sice klesají rozměry potřebných součástek, tedy i celého měniče, ale také klesá účinnost vlivem vyšších tepelných ztrát na spínacích součástkách. Tato práce je zaměřena na návrh snižujícího měniče, ale je potřeba mít přehled i o dalších topologiích.

1.2.1 Snižující měnič (buck)

Snižující měnič se používá v aplikacích, kdy je požadavek na snížení vstupního napětí na požadovanou hodnotu výstupního napětí.

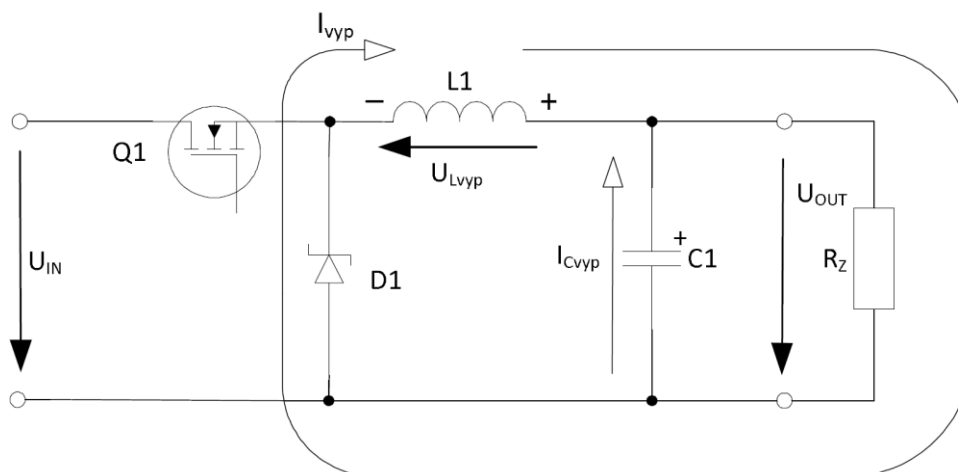
Činnost měniče, když je tranzistor sepnut, je znázorněna na obrázku č. 1.1, resp. na obrázku č. 1.2, když je tranzistor rozepnut.

Během sepnutého tranzistoru Q1 se cívka chová jako spotřebič, proud na ní má stejný směr jako napětí. Proud I_{zap} roste a je veden do zátěže. Proudem I_{Czap} se nabíjí kondenzátor. Výstupní napětí U_{OUT} roste. [1]



Obrázek 1.1 Snižující měnič – sepnutý tranzistor [10]

Během rozepnutého tranzistoru Q1 se cívka chová jako zdroj, napětí na ní má opačnou polaritu než proud. Proud I_{vyp} klesá a spolu s proudem I_{Cvyp} je vybíjen přes zátěž a diodu D1. Výstupní napětí U_{OUT} klesá. [1]



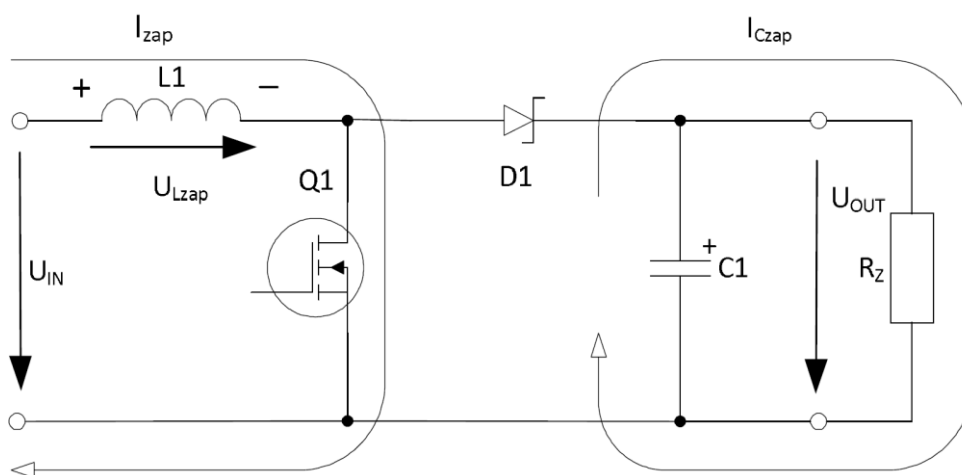
Obrázek 1.2 Snižující měnič – rozepnutý tranzistor [10]

1.2.2 Zvyšující měnič (boost)

Zvyšující měnič se používá v aplikacích, kdy je požadavek na zvýšení vstupního napětí na požadovanou hodnotu výstupního napětí.

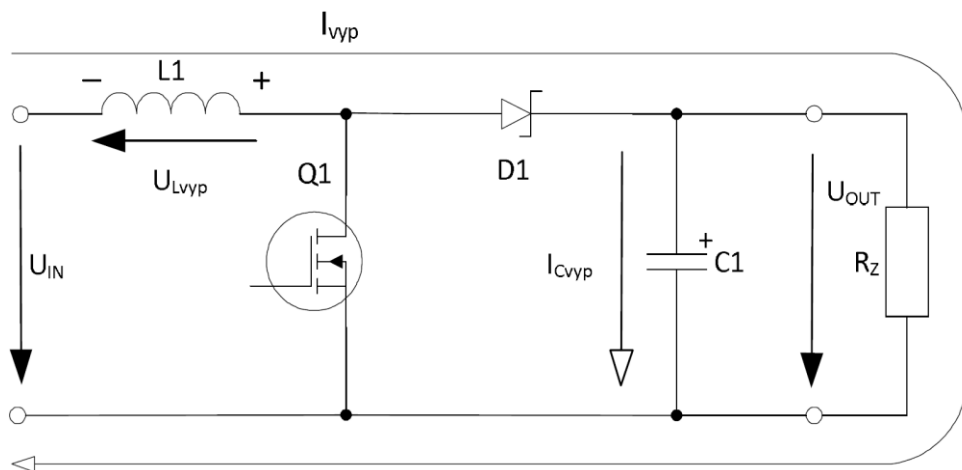
Činnost měniče, když je tranzistor sepnut, je znázorněna na obrázku č. 1.3, resp. na obrázku č. 1.4, když je tranzistor rozepnut.

Během sepnutého tranzistoru Q1 se cívka chová jako spotřebič, proud na ní má stejný směr jako napětí. Proud I_{zap} roste. Z kondenzátoru se vybíjí proud I_{Czap} do zátěže. Výstupní napětí U_{OUT} klesá. [1]



Obrázek 1.3 Zvyšující měnič – sepnutý tranzistor [10]

Během rozepnutého tranzistoru Q1 se cívka chová jako zdroj, napětí na ní U_{Lvyp} má opačnou polaritu. Proud I_{vyp} prochází do zátěže. Proud I_{Cvyp} nabíjí kondenzátor. Výstupní napětí U_{OUT} je dáno součtem napětí U_{IN} a U_{Lvyp} . [1]



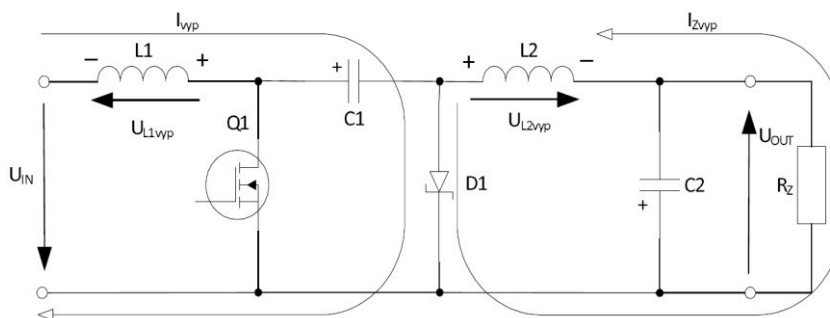
Obrázek 1.4 Zvyšující měnič – rozepnutý tranzistor [10]

1.2.3 Invertující měnič

Invertující měnič se používá v aplikacích, kde je zapotřebí udržet konstantní výstupní napětí i když vstupní napětí klesne pod jeho úroveň. To se může hodit při použití baterie, jako zdroje napětí, kde během používání její napětí klesá. Zpočátku tedy měnič funguje jako snižující, poté jako zvyšující.

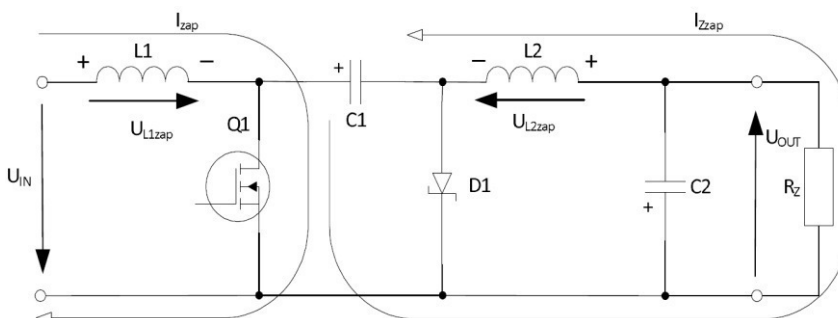
Dále bude popsána činnost jednoho z měničů, který dokáže napětí jak zvyšovat, tak snižovat. V tomto případě se jedná o Čukův měnič. Činnost měniče, když je tranzistor sepnut, je znázorněna na obrázku č. 1.6, resp. na obrázku č. 1.5, když je tranzistor rozepnut.

Během rozepnutého tranzistoru Q1 se cívka L1 chová jako zdroj a spolu se vstupním napětím nabíjí kondenzátor C1. Ten může být v závislosti na intervalu rozepnutí tranzistoru Q1 nabit až na hodnotu $U_{IN} + U_{L1vyp}$. Energie naakumulovaná v cívce L1 klesá, tím pádem při dostatečně dlouho rozepnutém tranzistoru Q1 by došlo k vybíjení kondenzátoru C1 zpět do zdroje. Tomu by se správným časováním mělo zabránit. Cívka L2 je z předchozích kroků nabitá, funguje jako zdroj proudu I_{Zvyp} , který se uzavírá přes diodu a zátěž. [1]



Obrázek 1.5 Čukův měnič – rozepnutý tranzistor [10]

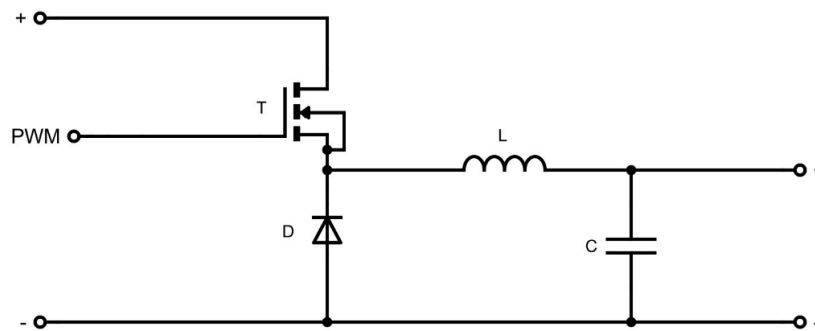
Během sepnutého tranzistoru se cívka L1 chová jako spotřebič, proud I_{L1zap} roste. Kondenzátor C1 se vybíjí do zátěže. Kondenzátor C2 se nabíjí a cívka L2 se chová jako spotřebič. [1]



Obrázek 1.6 Čukův měnič – sepnutý tranzistor [10]

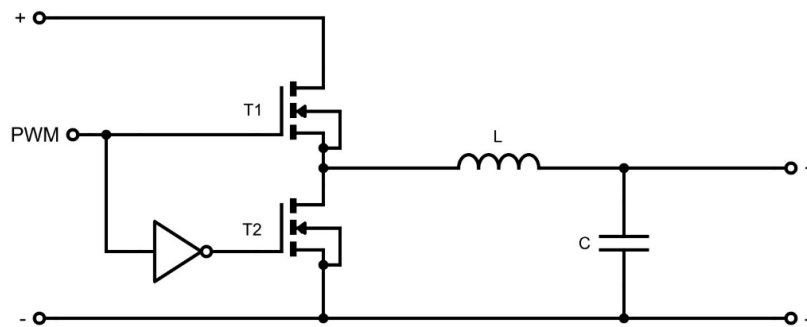
1.3 Synchronní snižující měnič

Synchronní usměrňování spočívá nahrazení usměrňovací diody (obrázek č. 1.7) tranzistorem MOSFET (obrázek č. 1.8). Výhodou synchronního usměrňování je vyšší účinnost, protože na diodě vzniká větší množství ztrát než na tranzistoru, a také fakt, že se synchronním usměrňováním se nemůže stát, že by měnič přecházel mezi režimy spojitých a nespojitých proudů, protože tranzistor je na rozdíl od diody průchozí v obou směrech. O režimu spojitých proudů je řeč, pokud proud na induktoru během spínacích cyklů je stále větší než 0. U režimu nespojitých proudů se během spínání proud dostane na nulovou hodnotu.[2]



Obrázek 1.7 Nesynchronní snižující měnič

Jak je vidět na obrázku č. 1.8, usměrňovací tranzistor T2 je řízen signálem, který vznikl negací signálu řídicího hlavní spínací tranzistor T1.



Obrázek 1.8 Synchronní snižující měnič

S tímto řízením může nastat problém v podobě jevu zvaného „shoot – through“, volně přeloženo jako zkrat. Může se stát, že na krátký okamžik mohou být oba dva tranzistory otevřeny a vstupní napětí má přímo cestu na zem. To je nežádáný stav, který by vedl ke zničení spínacích tranzistorů. Řešením je nastavení tzv. „dead – time“, tedy času mezi spínáním, kdy oba tranzistory budou zavřeny. Poté je potřeba pamatovat na to, že pokud jsou oba tranzistory uzavřeny, proud na cívce nemá kudy téct. Pokud je na cívce proud větší, než je schopna přenést integrovaná dioda v tranzistoru je potřeba paralelně k ní zapojit diodu dimenzovanou na tento proud. [2]

2 POROVNÁNÍ ŘÍDÍCÍCH OBVODŮ

Řídící obvody pro střídavé DC/DC měniče jde rozdělit do dvou hlavních skupin. První skupinou jsou konvertory, které mají integrované spínací tranzistory a návrhář doplní pouze diskrétní součástky. Výhodou konvertorů je tedy jednoduchost návrhu a většinou i nižší cena. Nevýhodou je, že se návrhář musí spokojit s parametry tranzistorů, které jsou dané a není možné nějak pracovat s řídicími signály. Druhou skupinou jsou kontroléry, které obsahují veškerou řídicí část obvodu, spínané prvky jsou však zapojovány externě. Měnič realizovaný v této práci by měl mít parametry uvedené v tabulce č. 2.1.

Tabulka 2.1 Požadované parametry navrhovaného měniče

V_{IN}	7-27 V
V_{OUT}	6 V
I_{OUT}	0 - 3 A
F_{SW}	440 kHz
ΔV_{OUT}	1 %

Měnič bude realizován tak, aby splňoval normy VW80000 a TL81000. Skrze tyto normy je požadováno, aby měnič fungoval až do hodnoty vstupního napětí 27 V. Výstupní napětí je požadováno 6 V, protože budou připojeny dvě led diody, každá o úbytku napětí maximálně 2,7 V, zbylých 0,6 V bude použito pro nastavování proudu do diod. Spínací frekvence je zvolena na základě kompromisu mezi velikostí navrženého měniče a jeho účinností. Důležitým faktem je také to, že limity vyzařování rušení, jak do vodiče, tak do okolí, jsou v pásmu 280 kHz až 520 kHz mnohem mírnější, než je tomu při vyšších frekvencích. Aby bylo dosaženo co nejpřesnější hodnoty výstupního napětí, je zvoleno malé malé zvlnění 1 %. Je jasné, že vlivem tolerancí součástek bude výsledná hodnota větší.

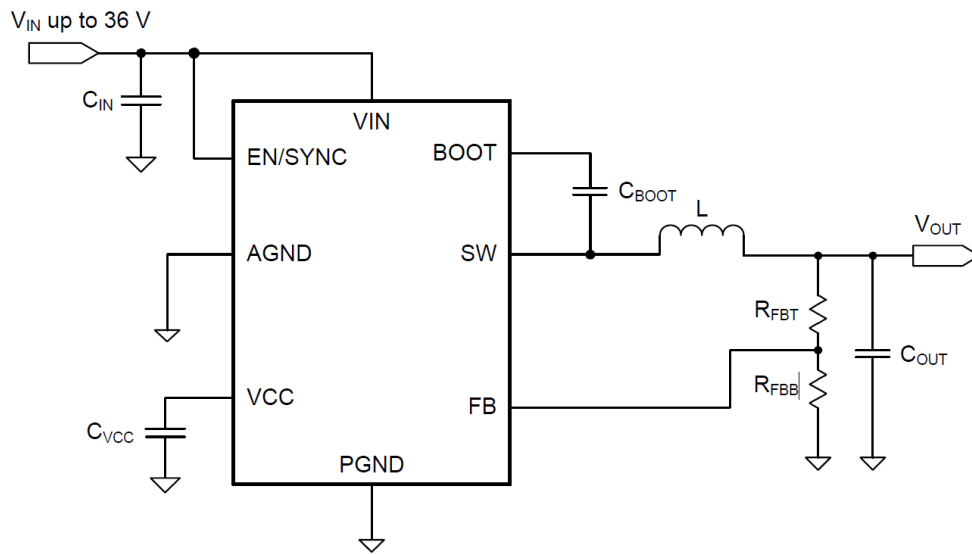
Řídících obvodů pro takové aplikace je velmi mnoho, pracujících s různými topologiemi. Požadavkem vedoucího práce ovšem je navrhnout synchronní snižující měnič. Nutností je kvalifikace řídicího obvodu pro použití v automobilech a schopnost splňovat parametry zadané v tabulce č. 2.1. Důležité je také, aby obvod byl schopen již od 7 V vstupního napětí vytvořit na výstupu napětí 6 V. Proto byl kladen požadavek na co nejvyšší možnou střidu, tedy 99 % a více. Tyto požadavky zúžily výběr na 4 obvody uvedené v tabulce č. 2.2.

Tabulka 2.2 Základní parametry čtyř vybraných obvodů [3][4][5][6]

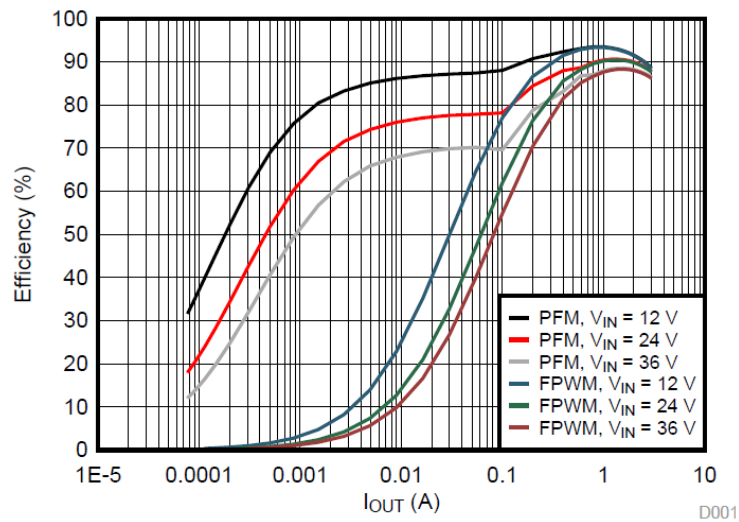
	LM25141-Q1	NCV8851-1	LM43603-Q1	LMR23630-Q1
typ	kontrolér	kontrolér	konvertor	konvertor
výrobce	TI	ON Semi	TI	TI
pouzdro	VQFN (24)	TSSOP-20	HTSSOP (16)	HSOIC (8)
V_{IN}	3,8 – 42 V	4,5 – 40 V	3,5 – 36 V	4 – 36 V
V_{OUT}	1,5 – 15 V		1 – 28 V	1 – 28 V
F_{SW}	440 kHz, 2,2 MHz	170 – 500 kHz	0,2 – 2,2 MHz	0,2 – 2,2 MHz
$V_{DROPMIN}$	0,5 V (5 V)	0,2 V	0,8 V (5 V, 2,5 A)	1,8 V (5 V, 3 A)
$R_{\theta JA}$	24 °C/W	108 °C/W	38,9 °C/W	42 °C/W

2.1 LMR23630-Q1

Typické zapojení s tímto konvertorem je vidět na obrázku č. 2.1. Výhodou tohoto konvertoru je především jeho jednoduchost a dobrá účinnost okolo 90 % při výstupním proudu 1 A a víc, což je vidět na obrázku č. 2.2. Jeho velkou nevýhodou je ovšem velký minimální pokles vstupního napětí, který činí 1,8 V (pro výstupní napětí 5 V a výstupní proud 3 A). Navrhovaný měnič musí mít tento minimální úbytek menší než 1 V, aby byl měnič schopný udělat z 7 V na vstupu 6 V na výstupu. Pro tuto nevýhodu je nutné jej z výběru vyřadit.



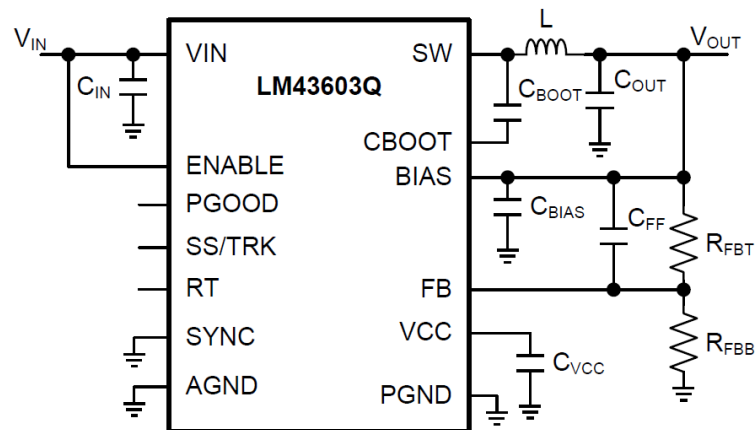
Obrázek 2.1 Typické zapojení s konvertorem LMR23630-Q1 [4]



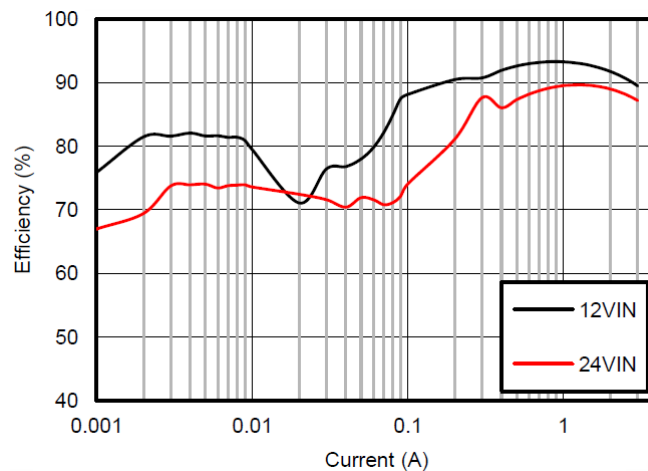
Obrázek 2.2 Závislost účinnosti na výstupním proudu u konvertoru LMR23630-Q1 ($F_{sw} = 400$ kHz, $V_{out} = 5$ V) [4]

2.2 LM43603-Q1

Typické zapojení s tímto konvertorem je vidět na obrázku č. 2.3. Výhodou tohoto konvertoru je opět jeho jednoduchost a dobrá účinnost okolo 90 % při výstupním proudu okolo 1 A, což je vidět na obrázku č. 2.4. Minimální pokles vstupního napětí u tohoto konvertoru dosahuje hodnoty 0,8 V. Což by mohlo být dostačující.



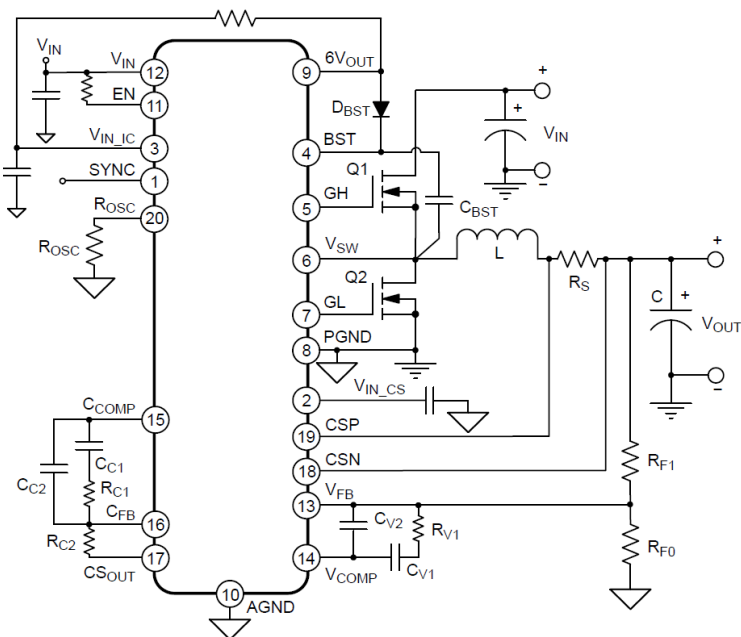
Obrázek 2.3 Typické zapojení s konvertorem LM43603-Q1 [5]



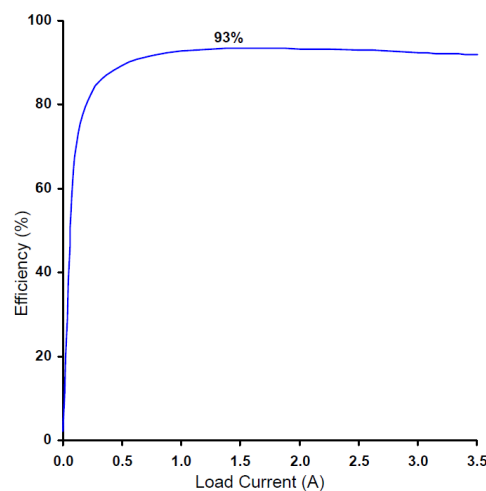
Obrázek 2.4 Závislost účinnosti na výstupním proudu u konvertoru LM43603-Q1 ($F_{sw} = 500 \text{ kHz}$, $V_{out} = 5 \text{ V}$) [5]

2.3 NCV8851-1

Typické zapojení s tímto kontrolérem je vidět na obrázku č. 2.5. Výhodou tohoto kontroléru je nízká hodnota minimálního poklesu vstupního napětí. Dosahuje hodnoty 0,2 V. Další výhodou je dobrá účinnost dosahující hodnot přes 90 %, což je vidět na obrázku č. 2.6. Jelikož, je to kontrolér, je možné vybrat spínací tranzistory a dá se také pracovat s jejich řízením. Pro naši aplikaci by to byla dobrá možnost, která má ovšem jednu nevýhodu, a to je potenciální problém s chlazením. Vlivem staršího typu pouzdra má tento obvod tepelný odpor o hodnotě 108 °C/W, což je velká hodnota a bylo by nutné navrhnout zbytečně velkou desku plošných spojů, nebo použít chladič.



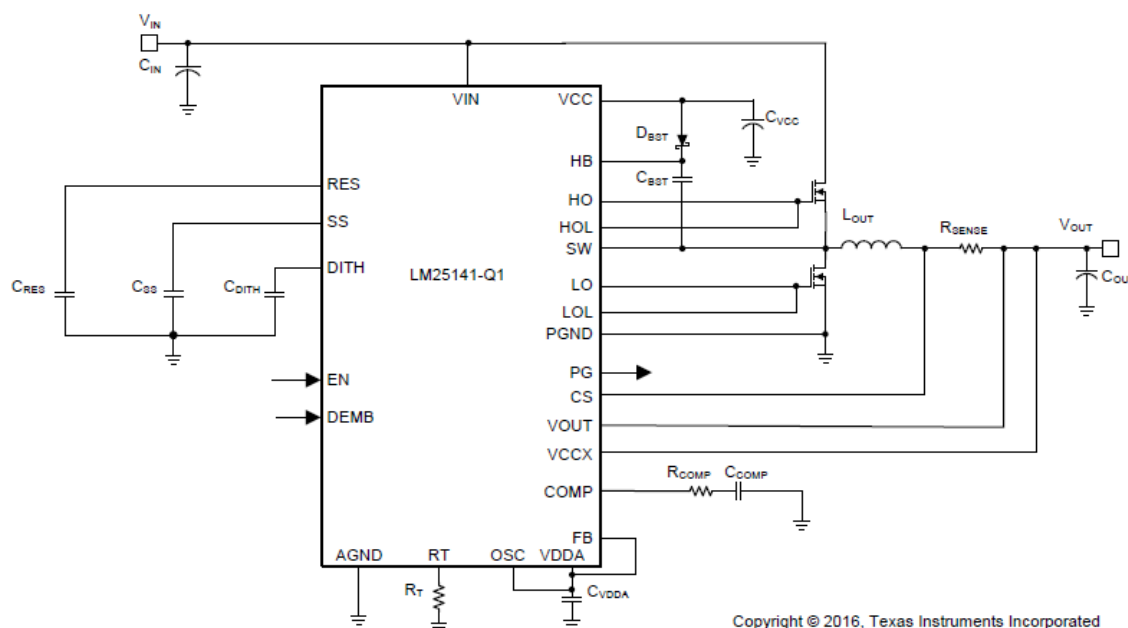
Obrázek 2.5 Typické zapojení s kontrolérem NCV8851-1 [6]



Obrázek 2.6 Závislost účinnosti na odebíraném proudu u kontroléru NCV8851-1 ($F_{sw} = 170 \text{ kHz}$, $V_{OUT} = 5 \text{ V}$) [6]

2.4 LM25141-Q1

Typické zapojení s tímto kontrolérem je vidět na obrázku č. 2.7. Tento obvod má výhody kontroléru stejně jako obvod NCV8851-1. Minimální pokles vstupního napětí má výrobcem udávanou hodnotu 0,5 V, což je dostačující. Na rozdíl od výše zmíněného obvodu má pouzdro, které vybaveno termální ploškou, která zajišťuje mnohem lepší odvod tepla.



Obrázek 2.7 Typické zapojení s kontrolérem LM25141-Q1 [3]

K výběru tedy zbývají dvě možnosti. A to konvertor LM43603-Q1 a kontrolér LM25141-Q1. Konvertory s integrovanými tranzistory jsou vhodnější pro aplikace, kde je vyžadována co nejmenší plocha na desce a nedosahuje se takových výkonů jako v našem případě. Aplikace s kontroléry jsou ale dražší a složitější na návrh. S ohledem na rezervu, co se týče výkonového zatížení byl pro řešení této práce raději zvolen kontrolér LM25141-Q1.

3 NÁVRH MĚNIČE

Tato kapitola je zaměřena na návrh zapojení měniče s řídicím obvodem LM25141Q1, který byl vybrán na základě porovnání v předchozí kapitole. Zadané parametry, které bude obvod mít jsou zaznamenány v tabulce č. 3.1.

Tabulka 3.1 Požadované parametry navrhovaného měniče

V_{IN}	7-27 V
V_{OUT}	6 V
I_{OUT}	0 - 3 A
F_{SW}	440 kHz
ΔV_{OUT}	1 %

Měnič bude realizován tak, aby splňoval normy VW80000 a TL81000. Skrze tyto normy je požadováno, aby měnič fungoval až do hodnoty vstupního napětí 27 V. Výstupní napětí je požadováno 6 V, protože budou připojeny dvě led diody, každá o úbytku napětí maximálně 2,7 V, zbylých 0,6 V bude použito pro nastavování proudu do diod. Spínací frekvence je zvolena na základě kompromisu mezi velikostí navrženého měniče a jeho účinností. Důležitým faktem je také to, že limity vyzařování rušení, jak do vodiče, tak do okolí, jsou v pásmu 280 kHz až 520 kHz mnohem mírnější, než je tomu při vyšších frekvencích. Aby bylo dosaženo co nejpřesnější hodnoty výstupního napětí, je zvoleno malé malé zvlnění 1 %. Je jasné, že vlivem tolerancí součástek bude výsledná hodnota větší.

3.1 Výstupní cívka a odpor pro snímání proudu

Pro výpočet minimální indukčnosti výstupní cívky byla použita rovnice[3]:

$$L_{OUT(MIN)} = \frac{V_{OUT}}{F_{SW} \cdot (0,3 \cdot I_{OUT})} = \frac{6}{440k \cdot (0,3 \cdot 3)} = 15,15 \mu H, \quad (3.1)$$

kde $L_{OUT(MIN)}$ je minimální hodnota indukčnosti cívky, V_{OUT} je hodnota požadovaného výstupního napětí, F_{SW} je zvolená spínací frekvence a I_{OUT} je výstupní proud. Hodnota indukčnosti byla s rezervou zvolena 22 μH . Pro další výpočty bylo potřeba určit maximální hodnotu střídý ze vztahu[3]:

$$D_{MAX} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MIN)}} = \frac{6}{7} = 0,857, \quad (3.2)$$

kde D_{MAX} je maximální hodnota střídý, V_{OUT} je hodnota výstupního napětí a $V_{IN(MIN)}$ je minimální hodnota vstupního napětí. Také bylo potřeba určit minimální hodnotu střídý ze vztahu[3]:

$$D_{MIN} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MAX)}} = \frac{6}{27} = 0,222, \quad (3.3)$$

kde D_{MIN} je minimální hodnota střídání, V_{OUT} je hodnota výstupního napětí a $V_{IN(MAX)}$ je maximální hodnota vstupního napětí.

Nyní bylo možné určit zvlnění proudu na cívce z rovnice[3]:

$$\Delta I = \frac{V_{IN(MAX)} - V_{OUT}}{L_{OUT}} \cdot \frac{D_{MIN}}{F_{SW}} = \frac{27-6}{17,6\mu} \cdot \frac{0,222}{399k} = 0,664 \text{ A}, \quad (3.4)$$

kde ΔI je zvlnění proudu na cívce, $V_{IN(MAX)}$ je maximální hodnota vstupního napětí, V_{OUT} je hodnota výstupního napětí, L_{OUT} je hodnota indukčnosti cívky, D_{MIN} je minimální hodnota střídání a F_{SW} je střídací frekvence. Aby bylo možné počítat s nejhorším případem, byla za hodnotu indukčnosti dosazena nejnižší možná hodnota v rámci výrobní tolerance cívky, která činí 30 %. Dosažená hodnota je tedy poté 17,6 μH . Pro spínací frekvenci také byla zvolena nejnižší hodnota v rámci přesnosti jejího nastavení a také rozmítání. V rámci tolerance spínací frekvence výrobce udává hodnotu 420 kHz, pokud dojde ještě vlivem rozmítání, které dosahuje hodnoty 5 %, k jejímu poklesu, může se dostat na hodnotu 399 kHz, která byla dosazena do vzorce. Poté je špičkový proud na cívce dán vztahem[3]:

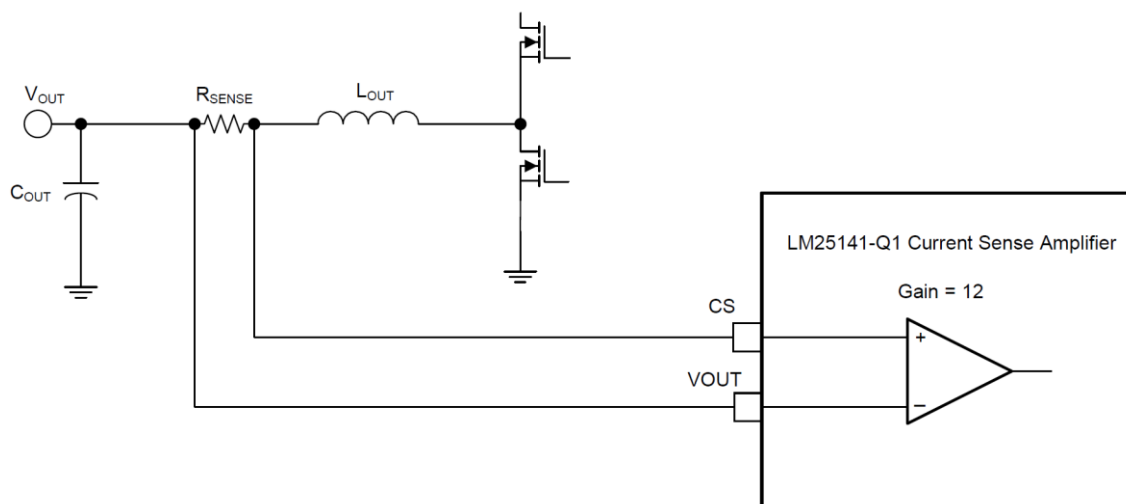
$$I_{PEAK} = I_{OUT} + \frac{\Delta I}{2} = 3 + \frac{0,664}{2} = 3,332 \text{ A}, \quad (3.5)$$

kde I_{PEAK} je špičkový proud na cívce, I_{OUT} je výstupní proud a ΔI je zvlnění proudu na cívce. Pro návrh cívky je vhodné znát efektivní hodnotu proudu, který jí prochází. K tomu byl použit vztah[3]:

$$I_{L_RMS} = \sqrt{I_{OUT}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}} = \sqrt{3^2 + \frac{0,664^2}{12}} = 3,006 \text{ A}, \quad (3.6)$$

kde I_{L_RMS} je efektivní proud na cívce, ΔI je zvlnění proudu na cívce a I_{OUT} je výstupní proud.

Ze znalosti špičkového proudu na cívce se dala vypočítat hodnota rezistoru pro snímání proudu na cívce. Zapojení tohoto rezistoru v obvodu je možné vidět na obr. č. 3.1.



Obrázek 3.1 Zapojení snímacího rezistoru[3]

Kvůli rezervě bylo vhodné za proud na rezistoru dosadit hodnotu o 20 % větší než je špičkový proud na cívce. Hodnota rezistoru je dána vztahem[3]:

$$R_{SENSE} = \frac{V_{CS}}{I_{R_{SENSE}}} = \frac{V_{CS}}{1,2 \cdot I_{PEAK}} = \frac{68\text{m}}{1,2 \cdot 3,332} = 0,017 \, \Omega, \quad (3.7)$$

kde R_{SENSE} je hodnota odporu rezistoru pro snímání proudu na cívce, V_{CS} je napětí na výstupu CS, dané hodnotou 75 mV a I_{PEAK} je špičkový proud na cívce. Hodnota byla zvolena 16 mΩ. Nyní je možné vypočítat předpokládanou výkonovou ztrátu ze vztahu[3]:

$$P_{RSENSE} = I_{L_{RMS}}^2 \cdot R_{SENSE} = 3,006^2 \cdot 0,016 = 144,6 \text{ mW}, \quad (3.8)$$

Kde P_{RSENSE} je výkonová ztráta, $I_{L_{RMS}}$ je efektivní proud na cívce a R_{SENSE} je hodnota odporu rezistoru pro snímání proudu na cívce. Rezistor musí být dimenzován minimálně na dvojnásobek předpokládané výkonové ztráty, tedy na 325 mW. Výrobce doporučuje použít rezistor s malou tolerancí a nízkou parazitní indukčností. Vlivem zpoždění na komparátoru, logické části obvodu a na obvodech řídicích hradla spínacích tranzistorů může být špičkový proud ještě větší, než bylo do teď předpokládáno. S nejhorším případem počítá rovnice[3]:

$$I_{PEAK(MAX)} = \frac{V_{CS}}{R_{SENSE}} + \frac{V_{IN(MAX)} \cdot t_{dly}}{L_{OUT}} = \frac{75\text{m}}{16\text{m}} + \frac{27 \cdot 40\text{n}}{17,6\mu} = 4,75 \text{ A}, \quad (3.9)$$

kde $I_{PEAK(MAX)}$ je maximální špičkový proud na cívce, V_{CS} je napětí na výstupu CS, dané hodnotou 75 mV, R_{SENSE} je hodnota odporu rezistoru pro snímání proudu na cívce, $V_{IN(MAX)}$ je maximální hodnota vstupního napětí, t_{dly} je maximální hodnota zpoždění daná hodnotou 40 ns a L_{OUT} je hodnota indukčnosti cívky. Za hodnotu indukčnosti cívky je opět dosažena hodnota ze spodní hranice její výrobní tolerance. Výstupní cívka by tedy měla být dimenzována na proudy větší než 4,75 A.

3.2 Výstupní kondenzátor

Pro výpočet hodnoty kapacity výstupního kondenzátoru byla použita rovnice[3]:

$$C_{OUT(MIN)} = \frac{L_{OUT} \cdot I_{STEP}^2}{2 \cdot \Delta V_{OUT} \cdot D_{MAX} \cdot (V_{IN(MIN)} - V_{OUT})} = \frac{22 \mu \cdot 1^2}{2 \cdot 60 \text{ m} \cdot 0,857 \cdot (7 - 6)} = 175 \mu\text{F}, \quad (3.10)$$

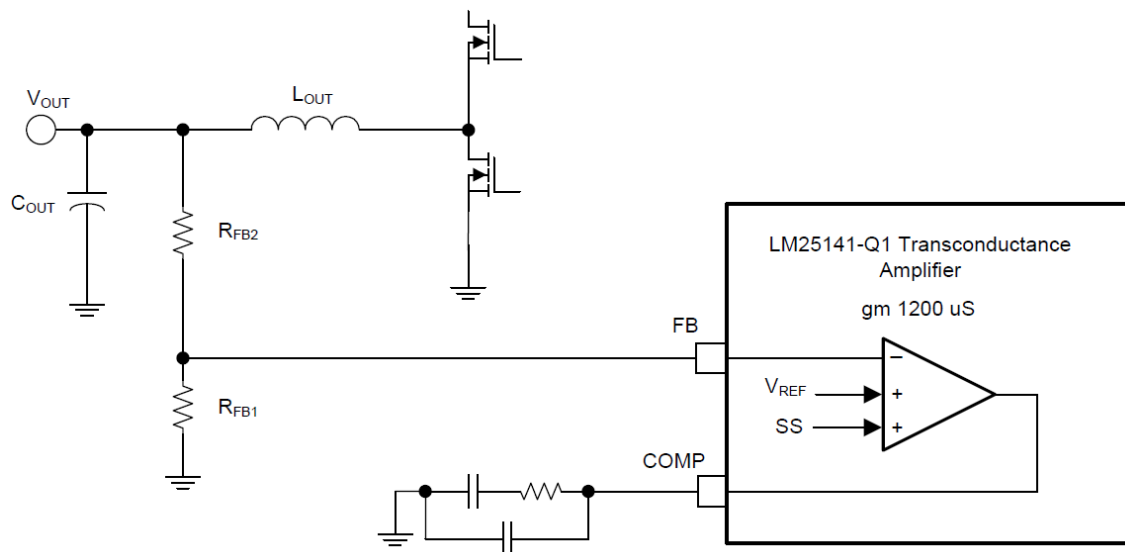
kde L_{OUT} je hodnota indukčnosti cívky, I_{STEP} je proud, který si zátěž může skokově vzít nad rámec zvoleného výstupního proudu, ΔV_{OUT} je maximální hodnota zvlnění, které bylo chtěno dosáhnout (V našem případě byla zvolena hodnota 60 mV, tedy 1 % zvlnění výstupního napětí 6 V), D_{MAX} je maximální hodnota střidy, $V_{IN(MIN)}$ je minimální hodnota vstupního napětí a V_{OUT} je hodnota výstupního napětí. Ještě bylo zapotřebí vypočítat efektivní hodnotu zvlnění výstupního proudu, aby vybraný kondenzátor byl na něj dimenzovaný. K tomu posloužil vztah[3]:

$$I_{OUT(RMS)} = \frac{\Delta I}{\sqrt{12}} = \frac{0,626}{\sqrt{12}} = 0,181 \text{ A}, \quad (3.11)$$

kde $I_{OUT(RMS)}$ je efektivní hodnota zvlnění výstupního proudu a ΔI je zvlnění proudu na cílce. Hodnota výstupní kapacity byla zvolena 188 μF a bude tvořena čtyřmi paralelně zapojenými kondenzátory o kapacitě 47 μF , dimenzovaných na napětí 10 V. Použití více paralelně zapojených kondenzátorů je vhodné z důvodu menšího výsledného sériového odporu (ESR).

3.3 Zpětnovazební smyčka a kompenzační pole

Pro nastavení výstupního napětí byl použit rezistorový dělič na zpětné vazbě. Zapojení je vidět na obrázku č. 3.2.



Obrázek 3.2 Zapojení odporového děliče ve zpětné vazbě [3]

Po vyjádření jednoho odporu vznikl vztah:

$$R_{FB2} = \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \cdot R_{FB1} = \left(\frac{6}{1,2} - 1 \right) \cdot 10k = 40 k\Omega, \quad (3.12)$$

kde V_{OUT} je požadované výstupní napětí, V_{REF} je referenční napětí na pinu zpětné vazby obvodu dané hodnotou 1,2 V, R_{FB2} a R_{FB1} jsou rezistory tvořící dělič. Hodnota odporu R_{FB1} byla zvolena 10 k Ω dle doporučení výrobce, aby byla splněna podmínka[3]:

$$\frac{R_{FB2} \cdot R_{FB1}}{R_{FB2} + R_{FB1}} > 5 k\Omega, \quad (3.13)$$

která zajišťuje, aby obvod rezistorový dělič detekoval a rozpoznal, že má být nastaveno zvolené napětí. Z úbytků napětí na rezistorech můžeme vypočítat jejich výkonové ztráty:

$$P_{RFB2} = \frac{V_{RFB2}^2}{R_{FB2}} = \frac{(V_{OUT} - V_{REF})^2}{R_{FB2}} = \frac{(6 - 1,2)^2}{40k} = 0,576 mW, \quad (3.14)$$

$$P_{RFB1} = \frac{V_{RFB1}^2}{R_{FB1}} = \frac{V_{REF}^2}{R_{FB1}} = \frac{1,2^2}{10k} = 0,144 mW, \quad (3.15)$$

kde R_{FB2} a R_{FB1} jsou rezistory tvořící dělič, V_{OUT} je výstupní napětí, V_{REF} je referenční napětí na pinu zpětné vazby, P_{RFB2} a P_{RFB1} jsou výkonové ztráty na rezistorech. Byly zvoleny odpory 40 k Ω , dimenzovaný minimálně na 1,2 mW, a 10 k Ω dimenzovaný na minimálně 0,3 mW.

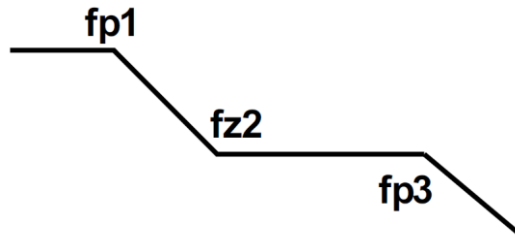
Bylo vhodné si stanovit rozsah výstupního napětí, který je způsoben výrobní tolerancí osazených rezistorů a také tolerancí referenčního napětí uvnitř integrovaného obvodu. V tomto případě budou osazeny rezistory o toleranci 1 %. Krajní hodnoty výstupního napětí nastanou, když hodnota jednoho odporu bude o 1 % větší a u toho druhého bude hodnota o 1 % menší. Tyto případy jsou zaznamenány v tabulce č. 3.2.

Tabulka 3.2 Rozptyl výstupního napětí v rámci tolerancí odporů ve zpětné vazbě

$R_{FB2} [\Omega]$	$R_{FB1} [\Omega]$	$V_{REF} [V]$	$V_{OUT} [V]$
40400	9900	1,207	6,133
39600	10100	1,193	5,871

Z tabulky je vidět, že vlivem tolerancí odporů ve zpětné vazbě a tolerance referenčního napětí se výstupní napětí může pohybovat od 5,871 V po 6,133V.

Bylo také zapotřebí navrhnout kompenzační pole k transkonduktančnímu zesilovači, aby nedošlo k rozkmitání zpětné vazby. Tento obvod je vidět na obr. č. 3.2, kde je připojený k pinu COMP. Je tvořen rezistorem R_{COMP} s kondenzátorem C_{COMP1} v sérii a k nim paralelně připojeným druhým kondenzátorem C_{COMP2} . Pomocí tohoto pole je možné vytvořit modulovou kmitočtovou charakteristiku tvaru, jaký můžeme vidět na obrázku č. 3.3.



Obrázek 3.3 Tvar kmitočtové charakteristiky vytvořené pomocí kompenzačního pole

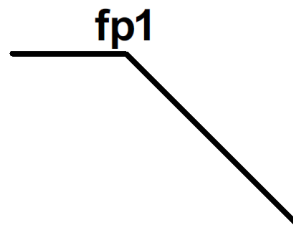
Pro první návrh byl osazen pouze kondenzátor C_{COMP2} , s tím, že rezistor R_{COMP} a kondenzátor C_{COMP1} budou v návrhu obsaženy, ale nebudou osazeny. Pomocí kondenzátoru byl vytvořen jeden kmitočtový pól f_{p1} , jehož hodnota je dána vztahem[3]:

$$f_{p1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{COMP2} \cdot R_{AMP}}, \quad (3.16)$$

kde C_{COMP2} je kapacita navrhovaného kondenzátoru, R_{AMP} je výstupní odpor zesilovače, která je roven hodnotě 2,5 MΩ. Kmitočtový pól f_{p1} bylo vhodné vytvořit na nízké frekvenci, dejme tomu okolo 1 Hz. Kapacita kondenzátoru C_{COMP2} byla vypočtena z upraveného vztahu:

$$C_{COMP2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{p1} \cdot R_{AMP}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 2,5M} = 64 \text{ nF}. \quad (3.16)$$

Hodnota kapacity kondenzátoru byla zvolena 100 nF. Kmitočtová charakteristika bude tedy odpovídat tvaru, který můžeme vidět na obrázku č. 3.4.



Obrázek 3.4 Tvar kmitočtové charakteristiky vytvořené kondenzátorem C_{COMP2}

Pokud kompenzace tímto způsobem nebude funkční, je možné osadit zbytek kompenzačního pole.

3.4 Nastavení spínací frekvence

Obvod LM25141-Q1 má interní oscilátor s dvěma možnostmi nastavení spínací frekvence (2,2 MHz a 440 kHz). Nastavení námi požadované frekvence bylo provedeno uzemněním pinu OSC. Spínací frekvence by mohla být nastavena v rozmezí 300-500 kHz pomocí rezistoru na výstupu RT, jehož odpor by byl dán vztahem[3]:

$$R_T = \frac{\frac{1}{F_{SW}} - 1,38 \cdot 10^{-5}}{4,5 \cdot 10^{-5}}, \quad (3.17)$$

kde F_{SW} je požadovaná spínací frekvence a R_T je hodnota odporu na výstupu RT.

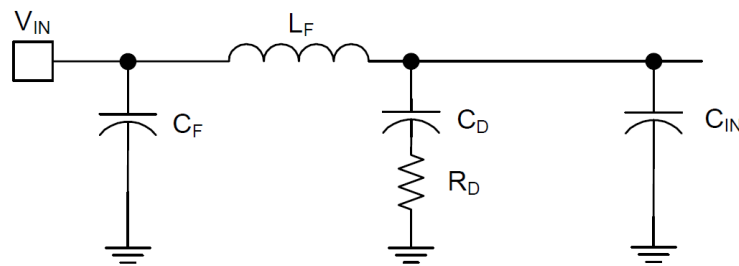
3.5 Vstupní filtr

Zapojení vstupního filtru je zobrazeno na obrázku č. 3.5. Hodnota vstupního kondenzátoru C_{IN} byla zvolena 10 μF . Kondenzátor C_D by měl podle výrobce mít kapacitu pětikrát větší než kondenzátor C_{IN} . Byla zvolena hodnota 47 μF . Cívka L_F by podle výrobce měla mít hodnotu mezi 1 μH a 10 μH . Byla zvolena hodnota 2,2 μH .

Pro další výpočty bylo nutné znát požadovaný útlum filtru, k němuž vede vztah[3]:

$$\begin{aligned}
 L_{dB} &= 20 \cdot \log \left[\frac{\frac{I_{PEAK}}{\pi^2 \cdot F_{SW} \cdot C_{IN}} \cdot \sin(\pi \cdot D_{MAX})}{1 \mu\text{V}} \right] - V_{MAX} = \\
 &= 20 \cdot \log \left[\frac{\frac{3,313}{\pi^2 \cdot 440\text{k} \cdot 10 \mu}}{1 \mu\text{V}} \cdot \sin(\pi \cdot 0,857) \right] - 50\text{dB}\mu\text{V} = \\
 &= 40,4 \text{ dB},
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

kde L_{DB} je požadovaný útlum filtru, I_{PEAK} je špičkový proud na výstupní cívce, F_{SW} je spínací frekvence, C_{IN} je hodnota vstupního kondenzátoru, D_{MAX} je maximální hodnota střidy, V_{MAX} je maximální hodnota rušení, kterou povoluje EMC norma. Hodnota 50 dB μV byla zvolena s rezervou, aby byla norma splněna.



Obrázek 3.5 Zapojení vstupního filtru [3]

Nyní bylo možné vypočítat hodnotu kapacity kondenzátoru C_F ze vztahu[3]:

$$C_F = \frac{1}{L_F} \cdot \left(\frac{\frac{L_{dB}}{10^{\frac{40}{40}}}}{2 \cdot \pi \cdot F_{SW}} \right)^2 = \frac{1}{1,8 \mu} \cdot \left(\frac{\frac{40,4}{10^{\frac{40}{40}}}}{2 \cdot \pi \cdot 440\text{k}} \right)^2 = 7,61 \mu\text{F}, \tag{3.19}$$

kde C_F je hodnota kapacity kondenzátoru, L_F je hodnota indukčnosti cívky, L_{DB} je požadovaný útlum filtru a F_{SW} je spínací frekvence. Hodnota kapacity byla zvolena $10 \mu\text{F}$.

Bylo také zapotřebí vypočítat hodnotu sériového odporu R_D kondenzátoru C_D , který by měl zmenšit impedanci při rezonanční frekvenci cívky L_F a kondenzátoru C_{IN} . Hodnota R_D by měla být menší než hodnota vypočtená vztahem[3]:

$$R_D = \sqrt{\frac{L_F}{C_{IN}}} = \sqrt{\frac{1,8\mu}{10\mu}} = 0,424 \Omega, \quad (3.20)$$

kde R_D je sériový odpor kondenzátoru C_D , L_F je hodnota indukčnosti cívky a C_{IN} je hodnota vstupního kondenzátoru. Kondenzátor CD musí mít hodnotu ESR maximálně $0,424 \Omega$.

Při výběru vstupních součástek bylo zapotřebí znát vstupní výkon a vstupní proud. Vstupní výkon je možné vypočítat ze vztahu[3]:

$$P_{IN} = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{\eta} = \frac{6 \cdot 3}{0,85} = 21,18 \text{ W}, \quad (3.21)$$

kde P_{IN} je vstupní výkon, V_{OUT} je výstupní napětí, I_{OUT} je výstupní proud a η je účinnost. Účinnost byla zvolena 85 %, protože této hodnoty by měl být měnič schopen dosáhnout. Vstupní proud byl potom vypočítán pomocí vzorce[3]:

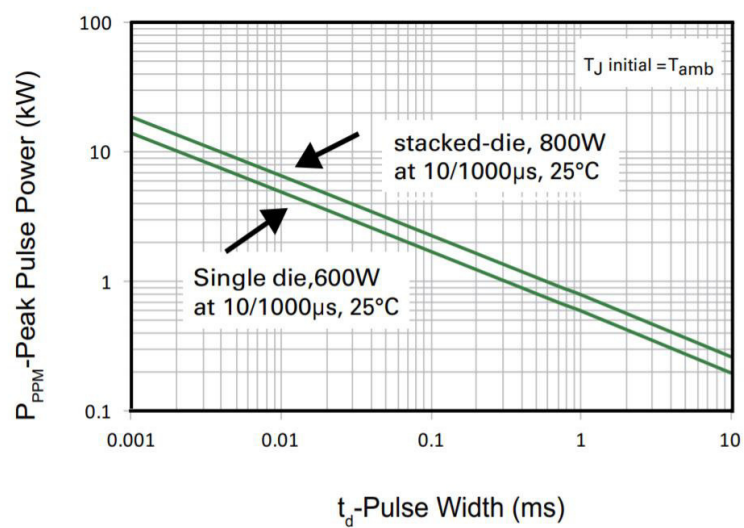
$$I_{IN} = \frac{P_{IN}}{V_{IN(MIN)}} = \frac{21,18}{7} = 3,03 \text{ A}, \quad (3.22)$$

kde I_{IN} je vstupní proud, P_{IN} je vstupní výkon a $V_{IN(MIN)}$ je minimální hodnota vstupního napětí.

Vstupní součástky by tedy měly být dimenzovány na proud 3,03 A a napětí větší než maximální vstupní napětí, tedy 27 V.

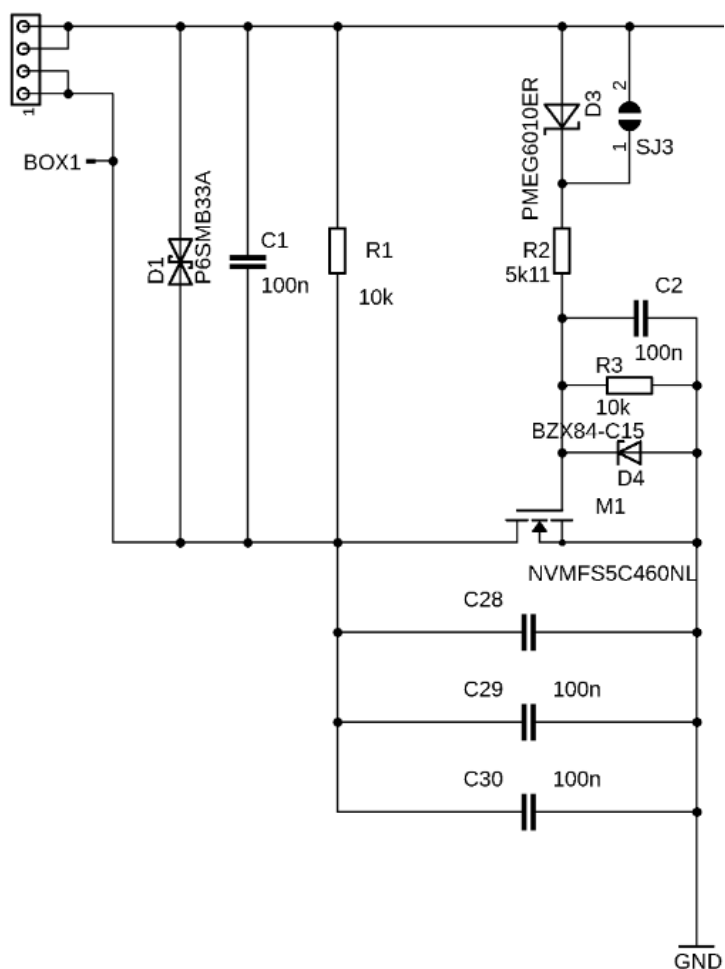
3.6 Vstupní ochrana

V rámci přepětové ochrany byl na vstup měniče umístěn obousměrný transil P6SMB33CA s provozním napětím do 28,2 V a se závěrným napětím 34,7 V. Transil je tu umístěn z důvodu ochrany před krátkodobým přepětím. Při delším připojení napětí většího, než je závěrné napětí, dojde ke zničení transilu a zkratování vstupních svorek. Tento konkrétní transil je schopen pojmout puls o výkonu 600 W po dobu trvání 1 ms. Výkonovou zatížitelnost v závislosti na šířce pulsu je vidět na obrázku č. 3.6.



Obrázek 3.6 Závislost špičkového výkonu, který je transil schopen pojmout, na šířce pulsu. [3]

Ochrana před obrácenou polaritou byla vytvořena pomocí zapojení s tranzistorem MOSFET, které je vidět na obrázku č. 3.7.



Obrázek 3.7 Vstupní ochrana

Tranzistor M1 je při kladném vstupním napětí stále otevřen. Jelikož tranzistor může mít na hradlo přivedeno napětí o maximální hodnotě 20 V, bylo zapotřebí pomocí odporů R2 a R3 vytvořit napěťový dělič, aby při vstupním napětí větším toto zapojení stále fungovalo. Při záporném vstupním napětí se tranzistor uzavře a napěťová smyčka se uzavírá přes odpor R1.

3.7 Spínací tranzistory a jejich řízení

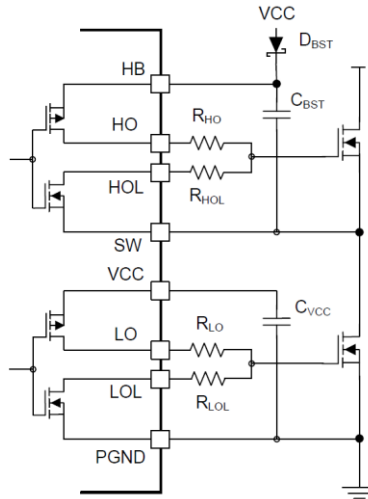
Pro volbu spínacích tranzistorů byly z dostupných možností vybrány NVMFS5C682NL a NVMFS5C670NL od výrobce ON Semiconductor. Oba tranzistory jsou velmi podobné, porovnání jejich parametrů je vidět v tab. č. 3.2.

Tabulka 3.3 Porovnání parametrů tranzistorů NVMFS5C682NL a NVMFS5C670NL [7][8]

	č. 1 NVMFS5C682NL	č. 2 NVMFS5C670NL
V_{DS}	60 V	60 V
$I_{D_{MAX}}$ (při 100°C)	18 A	50 A
$P_{D_{MAX}}$ (při 100°C)	14 W	31 W
I_S (Body diode)	31 A	68 A
$R_{\theta JA}$	43 °C/W	41 °C/W
$R_{DS(ON)}$	26 mΩ	7 mΩ
C_{IN}	410 pF	1400 pF
C_{OUT}	210 pF	690 pF
Q_G	2,5 nC	9 nC
t_r	12 ns	60 ns
t_f	1,5 ns	4 ns
Q_{RR} (Body diode)	7 nC	19 nC
t_{RR} (Body diode)	18 ns	34 ns
V_D (Body diode)	0,9 V	0,9 V

Tranzistor bude vystaven menšímu napětí než 60 V, proud na něm bude maximálně kolem 4 A a výkonové ztráty se budou pohybovat v jednotkách Wattů. V tomto ohledu vyhovují oba tranzistory. Z tabulky je vidět, že tranzistor č.1 má menší parazitní kapacity a je rychlejší, což se týče náběžných a sestupných hran. Tím pádem bude mít také menší výkonové ztráty. Rychlejší spínání ale také způsobuje větší rušení v oblasti elektromagnetické kompatibility. S ohledem na tyto aspekty byl vybrán NVMFS5C682NL.

Zapojení spínacích tranzistorů je zobrazeno na obrázku č. 3.8.



Obrázek 3.8 Zapojení spínacích tranzistorů MOSFET [3]

Rezistory R_{HO} , R_{HOL} , R_{LO} a R_{LOL} jsou tu proto, aby v případě spínání a rozepínání tranzistorů zajistily pomalejší průběh spínání. To je sice nežádoucí jev z hlediska účinnosti a ztrát, ale nebudou v obvodu vznikat takové špičkové proudy, které způsobují větší rušení v EMC oblasti. Podle výrobce se volí hodnota těchto odporů v jednotkách Ohmů. V rámci výběru rezistorů je vhodné ještě vypočítat možné výkonové zatížení. K tomu se dá využít kapacita na hradle tranzistoru, napětí, které na hradle během spínání bude a spínací frekvence. Výkon se dá vypočítat ze vztahu:

$$P_{R_L} = \frac{1}{2} \cdot C_G \cdot U_{GS}^2 \cdot f_{SW} = \frac{1}{2} \cdot 403p \cdot 5^2 \cdot 440k = 2,2 \text{ mW}, \quad (3.25)$$

kde P_{R_L} je ztrátový výkon na rezistoru, C_G je kapacita hradla tranzistoru, U_{GS} je napětí na hradle tranzistoru a f_{SW} je spínací frekvence. Pokud by bylo nutné tyto rezistory použít v rámci snížení EMC rušení, musely by být dimenzovány na výkon 5 mW. V prvním návrhu tyto rezistory budou osazeny s nulovou hodnotou odporu.

Kondenzátor C_{BST} je nabíjen přes diodu D_{BST} z VCC regulátoru napětím 5 V. Jeho kapacita byla vypočtena ze vztahu[3]:

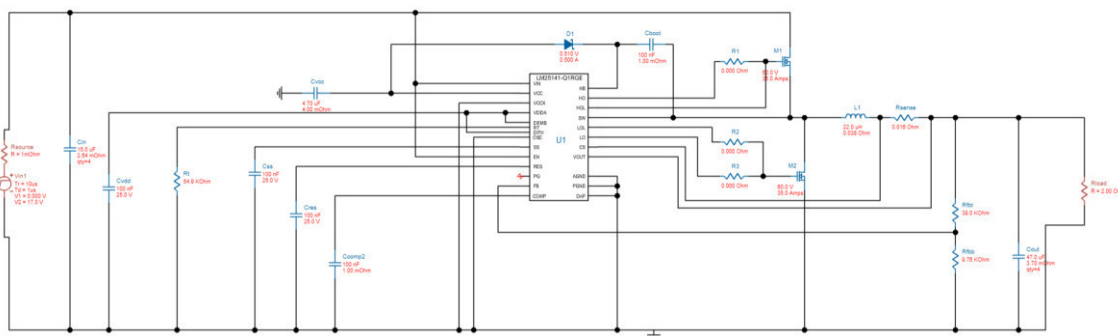
$$C_{BST} = \frac{Q_G}{\Delta V_{BST}} = \frac{2,5n}{200m} = 12,5 \text{ nF}, \quad (3.26)$$

kde C_{BST} je kapacita kondenzátoru, Q_G je celkový náboj na hradle horního spínacího tranzistoru, ΔV_{BST} je povolené zvlnění napětí dodávaného kondenzátorem, které výrobce doporučuje volit v rozmezí 100 mV až 300 mV. Byla zvolena hodnota kondenzátoru 15 nF. Výrobce doporučuje použít keramický kondenzátor s malým ESR. Dioda D_{BST} by měla mít co nejmenší úbytek napětí v propustném směru.

Na výstup regulátoru VCC bylo zapotřebí dát kondenzátor C_{VCC} připojený na zem. Na doporučení výrobce byla zvolena hodnota 4,7 μF s dimenzovaní na napětí 10 V.

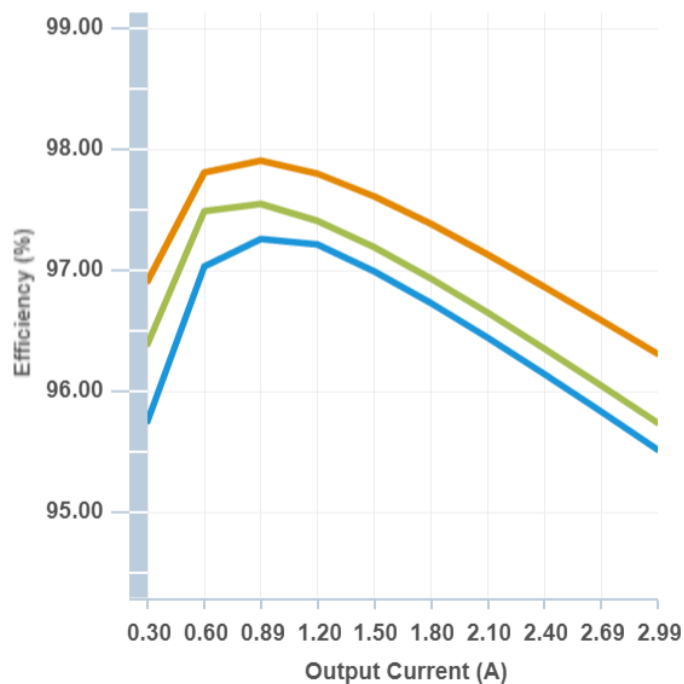
4 SIMULACE

V zadání práce je úkol pomocí simulací určit vliv rozptylu součástek na vlastnosti měniče. K tomu bylo zapotřebí mít funkční simulační model od výrobce řídicího obvodu. Ten k obvodu LM25141-Q1 zřejmě funkční není. Přes veškerou snahu se bohužel nepodařilo tento model zprovoznit. Jediné simulace, které byly tedy k dispozici, byly v prostředí Webench od firmy Texas Instruments, popřípadě TINA-TI. Bohužel ani jeden z těchto nástrojů není schopen vytvořit citlivostní analýzu, Monte-carlo či worst-case analýzu. Místo toho byly v této kapitole vytvořeny základní simulace odhadující funkčnost navrhovaného zapojení. Tyto simulace byly vytvořeny v prostředí Webench od firmy Texas Instruments. Jedná se o odhad účinnosti zařízení, simulaci startování obvodu, simulaci ustáleného stavu a simulaci skokové změny odebíraného proudu a vstupního napětí. Zapojení je vidět na obrázku č. 4.1.



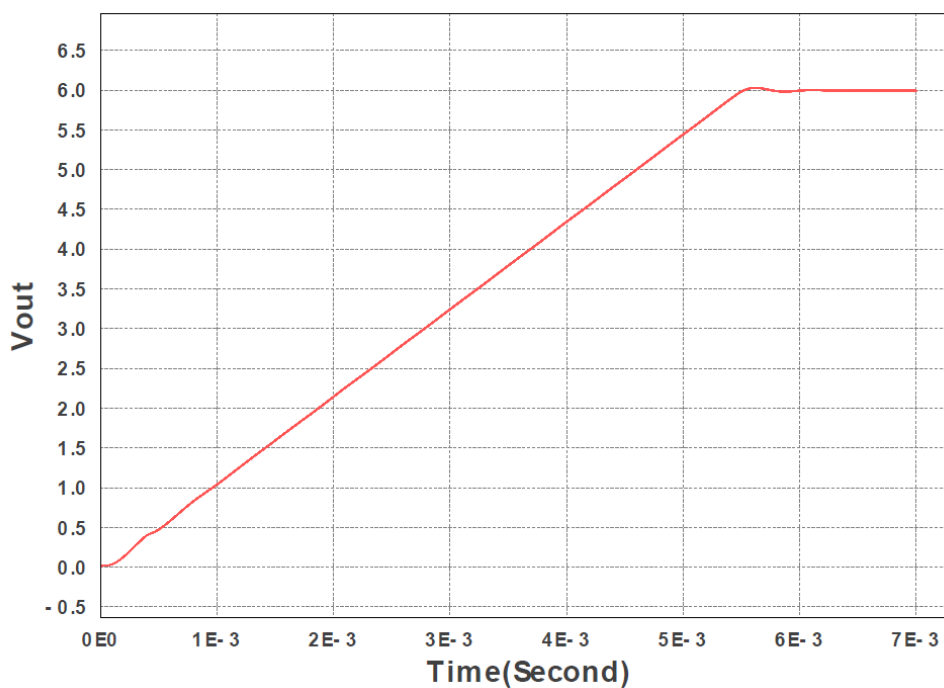
Obrázek 4.1 Zapojení pro simulace obvodu

Prostředí Webench nabízí odhad očekávané účinnosti, který je vidět na obrázku č. 4.2. Odhad je dle mého hodně optimistický, v reálném případě bude dobře, když bude účinnost přes 90 %.



Obrázek 4.2 Očekávaná účinnost pro navržený měnič v závislosti na odebíraném proudu, oranžově je znázorněna účinnost pro vstupní napětí 7 V, zeleně pro 17 V a modře pro 27 V

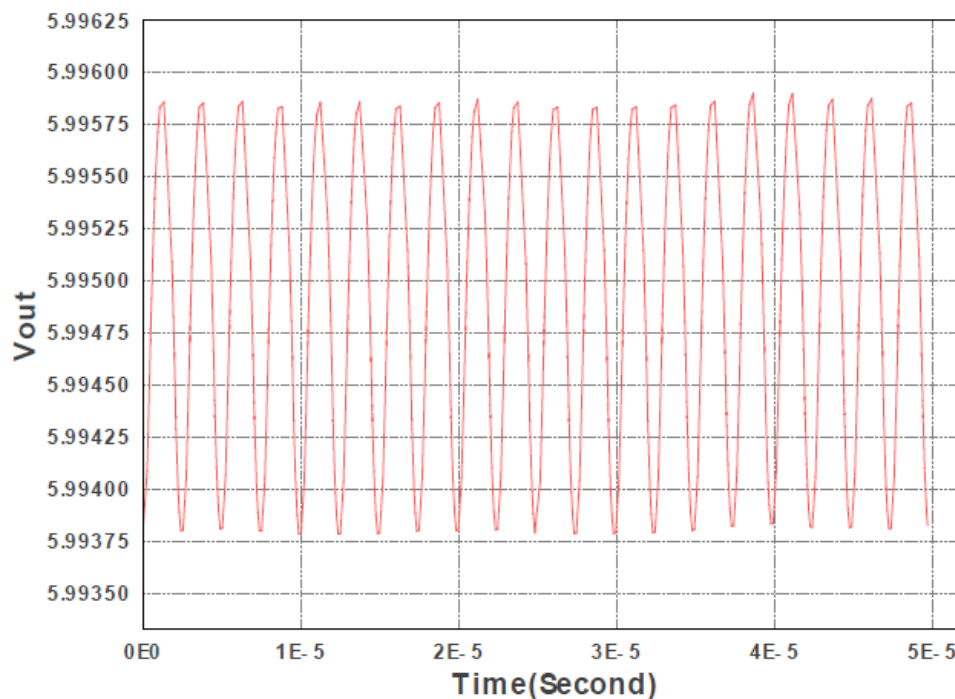
Dále byla provedena simulace pro startování obvodu. Její výsledek je vidět na obrázku č. 4.3.



Obrázek 4.3 Průběh výstupního napětí v závislosti na čase od připojení vstupního napětí 17 V

Ze simulace je vidět, že výstupní napětí 6 V je dodáváno přibližně 6 ms po zapnutí měniče. A tuto hodnotu již dále drží.

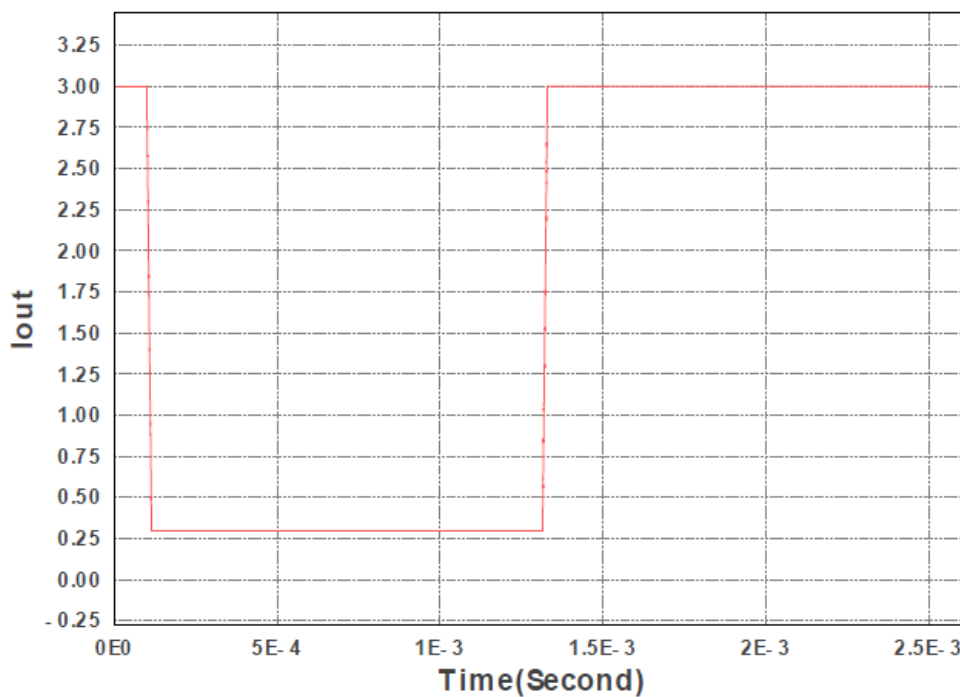
Dále byla provedena simulace ustáleného stavu. Její výsledek je vidět na obrázku č. 4.4.



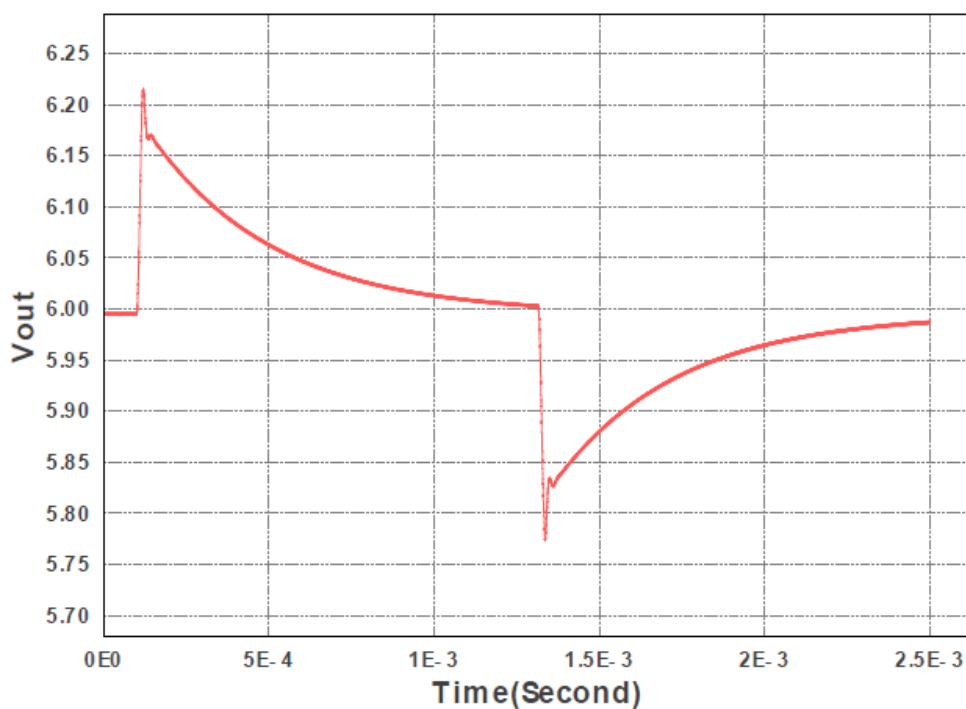
Obrázek 4.4 Zvlnění výstupního napětí v ustáleném stavu

Z výsledku simulace je vidět, že zvlnění dosahuje malých hodnot, řádově v jednotkách milivoltů.

Dále byla provedena simulace skokové změny odbíraného proudu ze 3 A na 0,25 A a zpět (obrázek č. 4.5). Její výsledek je vidět na obrázku č. 4.6.



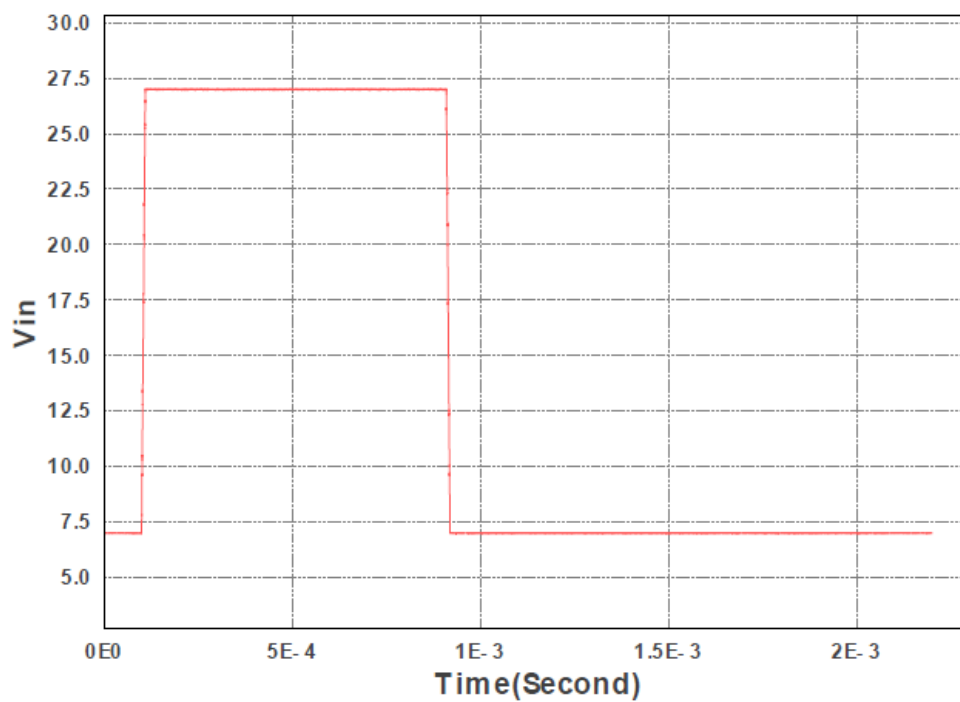
Obrázek 4.5 Skoková změna výstupního proudu z 3 A na 0,25 A a zpět



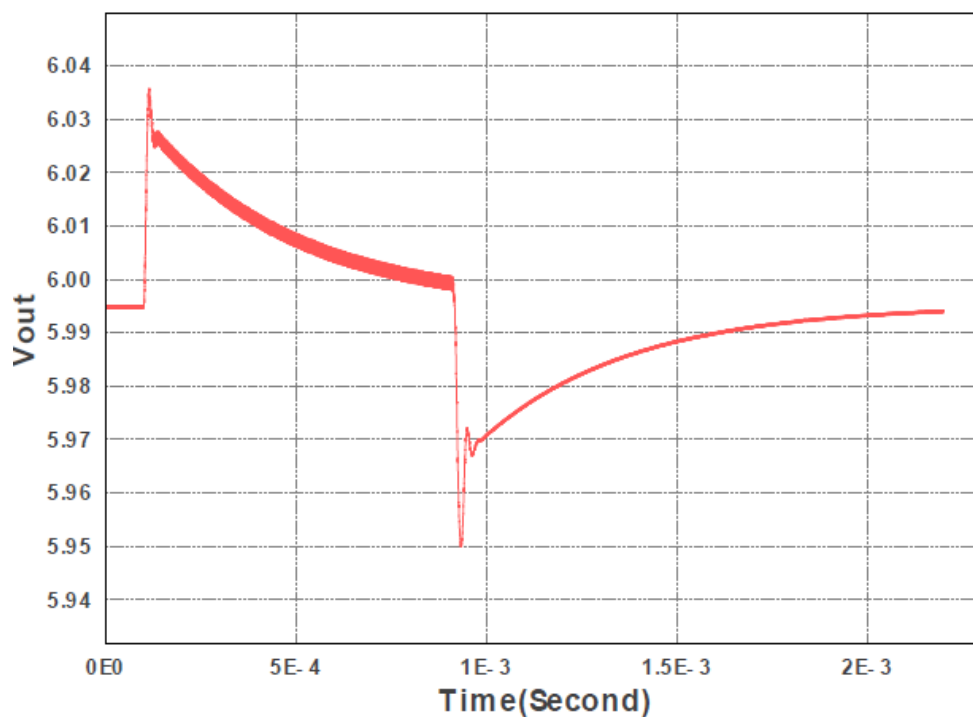
Obrázek 4.6 Reakce výstupního napětí na skokovou změnu výstupního proudu

Z výsledků simulace je vidět, že dojde k zákmitu výstupního napětí o velikosti cca 0,25 V, který se ale rychle ustálí.

Dále byla provedena simulace skokové změny vstupního napětí ze 7 V na 27 V a zpět (obrázek č. 4.7). Její výsledek je vidět na obrázku č. 4.8.



Obrázek 4.7 Skoková změna vstupního napětí ze 7 V na 27 V a zpět

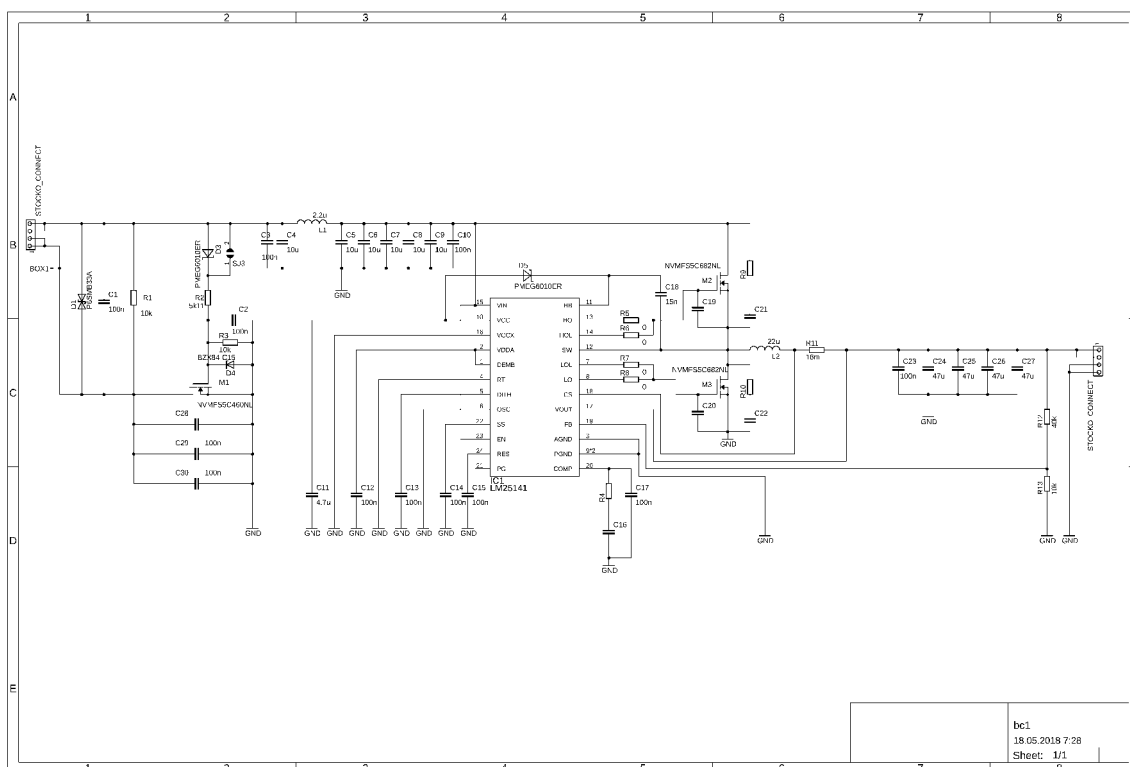


Obrázek 4.8 Reakce výstupního napětí na skokovou změnu vstupního napětí

Z výsledků simulace je vidět, že dojde k zákmitu výstupního napětí o velikosti cca 0,05 V, který se ale rychle ustálí. Podle simulací by navrhnutý měnič měl správně fungovat.

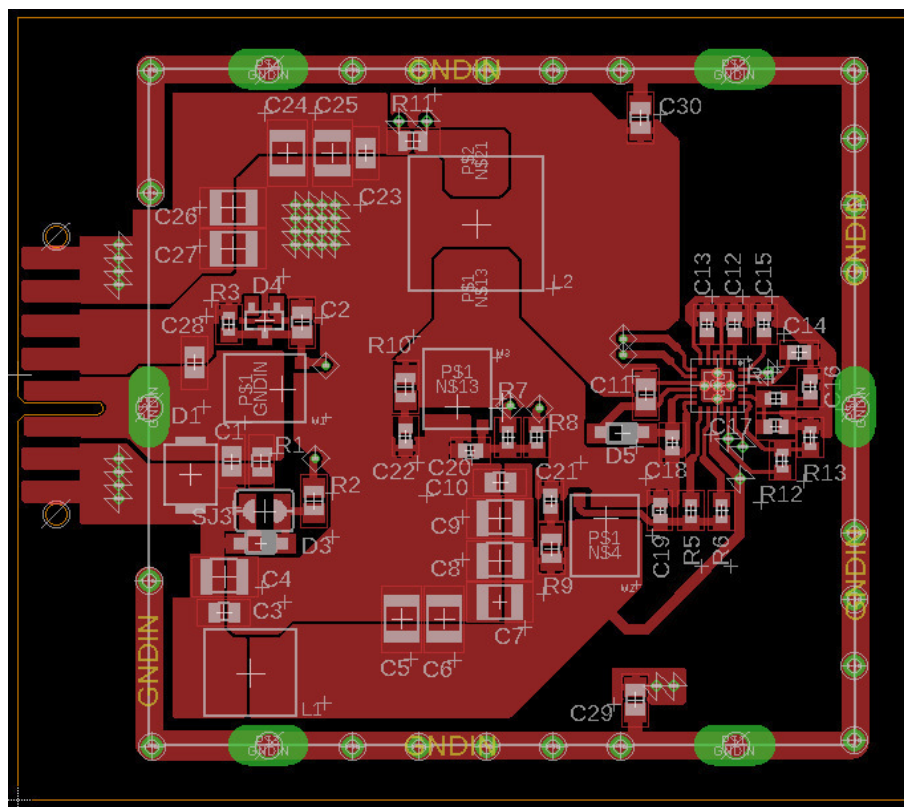
5 NÁVRH A VÝROBA DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ A JEJÍ OŽIVENÍ

Návrh desky plošných spojů byl realizován v programu EAGLE ve verzi 8.7.0. Schéma můžeme vidět na obrázku č. 5.1. Během návrhu byly do výkonových částí umístěny neosazené kondenzátory o kapacitě 100 nF, které se budou osazovat v případě, že bude zařízení produkovat rušení. Jako další možnosti vylepšení elektromagnetické kompatibility byly přidány kondenzátory mezi source a gate u spínacích tranzistorů. Také byly mezi drain a source těchto tranzistorů přidány neosazené tzv. „snubbery“ složené ze sériové kombinace rezistoru a kondenzátoru, které rovněž mohou vylepšit elektromagnetickou kompatibilitu.

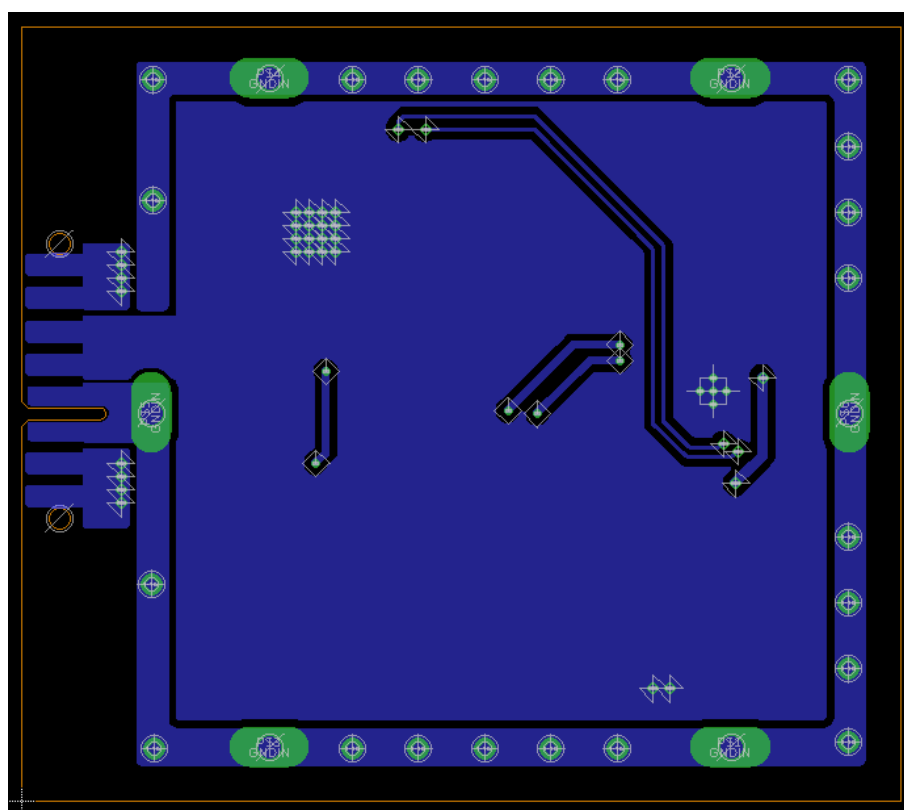


Obrázek 5.1 Schéma zapojení navrženého měniče

Při samotném návrhu desky bylo nejprve zapotřebí vytvořit součástky a pouzdra, které EAGLE ve svých knihovnách nenabízí. Dále byl zadán požadavek, aby všechny součástky a pokud možno i spoje byly na vrchní straně desky, která bude zakryta tunner boxem, který eliminuje vyzářené emise do prostoru. Rovněž bylo zapotřebí zvolit vhodný kompromis mezi rozmístěním součástek, kdy hlavní proudová smyčka by měla být co nejkratší, zároveň ale aby výkonové součástky, u kterých se očekává, že se budou více zahřívat, nebyly umístěny příliš blízko k sobě. Většinu doporučení daných výrobcem se podařilo splnit, až na pár výjimek. Například spoje mezi integrovaným obvodem a odporem snímajícím proud na výstupu se nepodařilo udělat co nejkratší, a navíc musely být vytvořeny na druhé straně desky, což nebyl zas takový problém. Výsledný návrh desky je zobrazen na obrázcích č. 5.2 a 5.3.



Obrázek 5.2 Návrh desky plošných spojů – horní strana

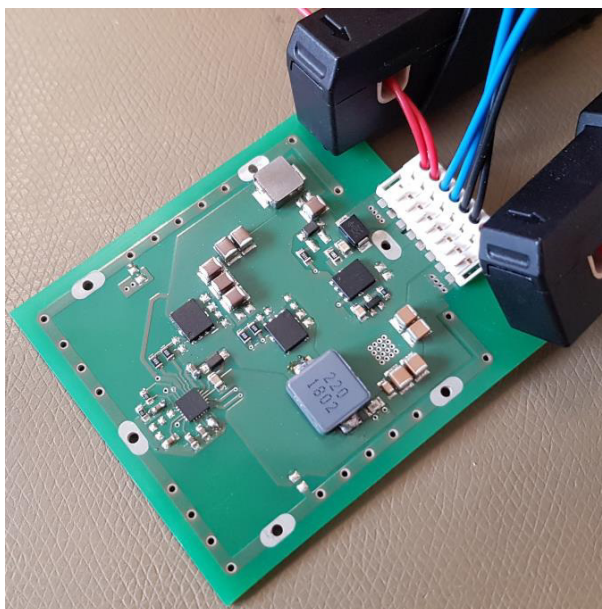


Obrázek 5.3 Návrh desky plošných spojů – spodní strana

Deska byla vyrobena přímo ve firmě, kde jsem práci vytvářel. Bylo vyrobeno a osazeno 9 kusů. Na obrázku č. 5.4 je snímek vyrobeného zařízení. Prvním problémem, který se objevil ještě, než došlo k pokusu o oživení měniče, byl chybný návrh děr na umístění tuner boxu, které o přibližně 0,5 mm byly posunuté. Tato chyba byla vyřešena pomocí upravení kontaktů boxu.

Při prvním oživení se zdálo, že měnič funguje bez potíží. Ovšem při odebírání vyšších proudů než 1,5 A se při vstupních napětích větších než 15 V obvod rozkmitával. Po různých pokusech o zjištění, kde je chyba, bylo zjištěno, že na spojích ke snímacímu odporu se při vyšších proudech vytváří zákmity, které poté spouštějí proudové omezení obvodu. Byl přidán RC filtr mezi vstupy CS a VOUT o hodnotách $R = 50\ \Omega$ a $C = 1\ \text{nF}$, který eliminoval vysokofrekvenční rušení. Poté již obvod plnil svou funkci.

Během hledání řešení přechozího problému bylo také zjištěno, že kondenzátor C_{BST} , navržený na hodnotu 15 nF byl navržen chybně. Výrobce udává, že hodnota kapacity by měla být nejméně 100 nF. Byl tedy nahrazen kondenzátorem o kapacitě 470 nF.



Obrázek 5.4 Osazená deska plošných spojů

6 MĚŘENÍ

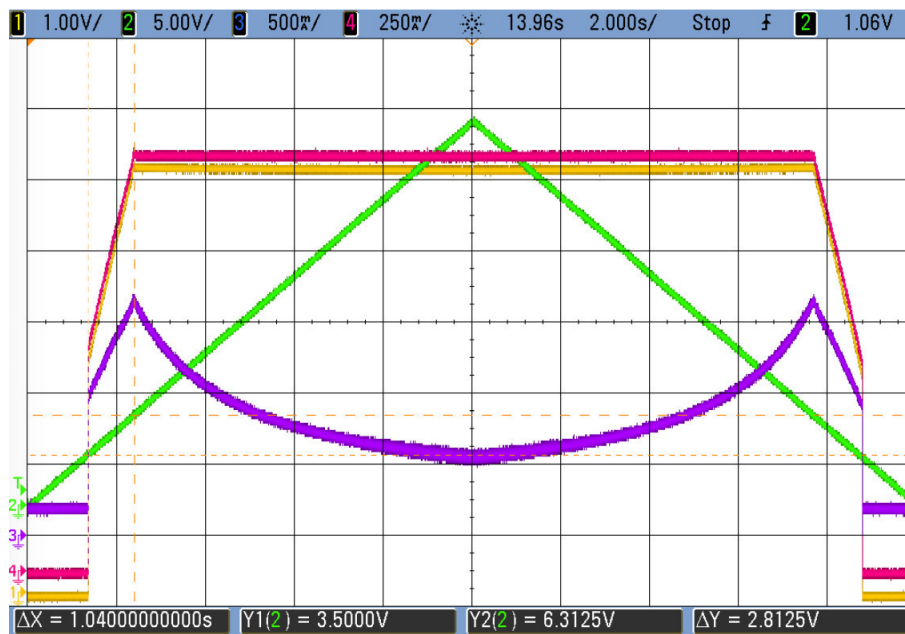
Měření bylo rozděleno na tři části. V první části byla ověřena funkčnost zařízení, změřena základní charakteristika, tedy závislost výstupního napětí na napětí vstupním a účinnost zařízení. V druhé části bylo zařízení podrobeno vybraným testům podle VW80000. Ve třetí části byly pomocí termokamery teplotní vlastnosti zařízení. V poslední části měření bylo zařízení podrobeno testům na elektromagnetické emise.

6.1 Ověření funkčnosti, základní charakteristika a účinnost zařízení

Navržený měnič by měl fungovat v rozsahu 7 – 27 V vstupního napětí. Při napájení LED diod v automobilu bude jeho pracovní rozsah 9 – 16 V vstupního napětí, s tím že typická hodnota je 13,5 V a odebíraný proud 1 – 1,5 A. Do měření byly přidány i hodnoty nižšího napětí, aby bylo vidět od jakého minimálního vstupního napětí navržený měnič pracuje. Měření bylo provedeno pro 3 výstupní proudy: 100 mA, 1 A a 3 A.

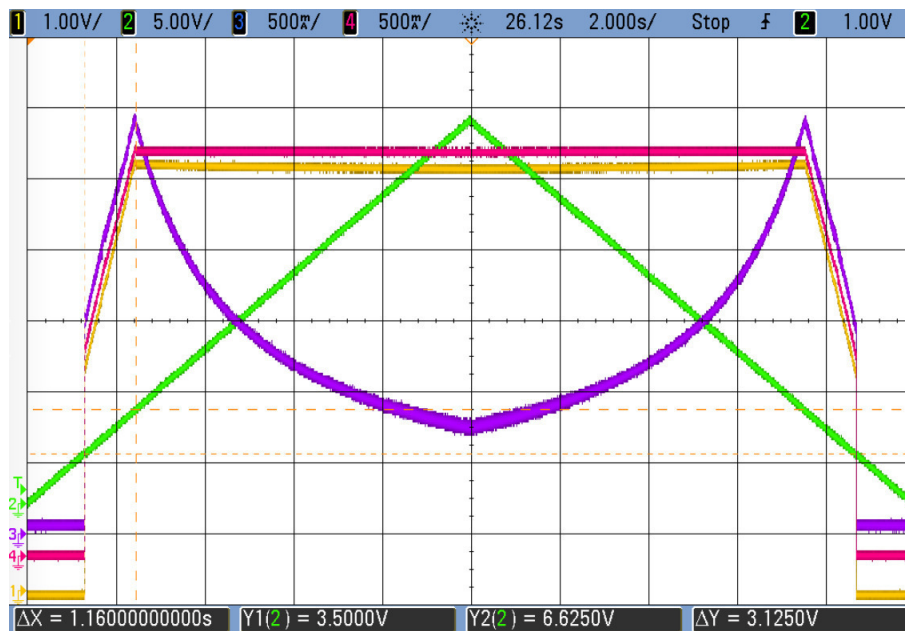
Nejprve bylo provedeno ověření funkčnosti zařízení. K tomu byl použit rampový průběh vytvořený generátorem se sklonem 2,7 V/s. K vytvoření signálu byl použit generátor Agilent 33210A s kombinací se stejnosměrným zdrojem Jager Elektronik SNG 1000W. Měření bylo provedeno pomocí osciloskopu Agilent DSO7014B. Napětí bylo snímáno napěťovými sondami zapojenými přímo k osciloskopu. K snímání proudů byly použity proudové sondy Tektronix TCPA300. Při měření účinnosti byl použit zdroj AIM-TTI CPX400D.

Na obrázku č. 6.1 je vidět oscilogram pořízený při výstupním proudu 1,5 A. Z obrázku je vidět, že požadované úrovně 6 V výstupního napětí je schopen měnič dosáhnout už při 6,31 V vstupního napětí a dále drží výstupní napětí na konstantní hodnotě v celém požadovaném rozsahu 7 – 27 V.



Obrázek 6.1 Ověření funkce měniče při odebíraném proudu 1,5 A, zelenou barvou je znázorněn průběh vstupního, fialovou barvou je znázorněn průběh vstupního proudu, žlutou barvou je znázorněno výstupní napětí a červenou barvou je znázorněn výstupní proud

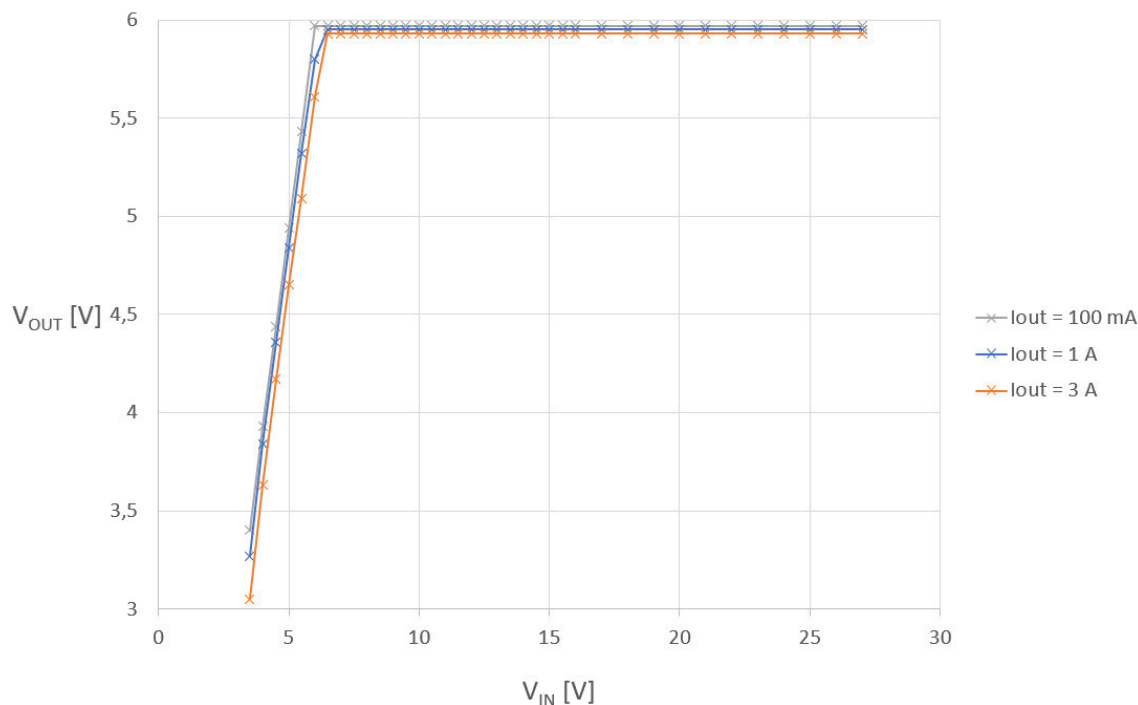
Na obrázku č. 6.2 je vidět oscilogram pořízený při výstupním proudu 3 A. Požadované úroveň 6 V výstupního napětí je schopen dosáhnout při 6,63 V vstupního napětí a také dále drží výstupní napětí na konstantní hodnotě v celém požadovaném rozsahu 7 – 27 V.



Obrázek 6.2 Ověření funkce měniče při odebíraném proudu 3 A, fialovou barvou je znázorněn průběh vstupního proudu, žlutou barvou je znázorněno výstupní napětí a červenou barvou je znázorněn výstupní proud

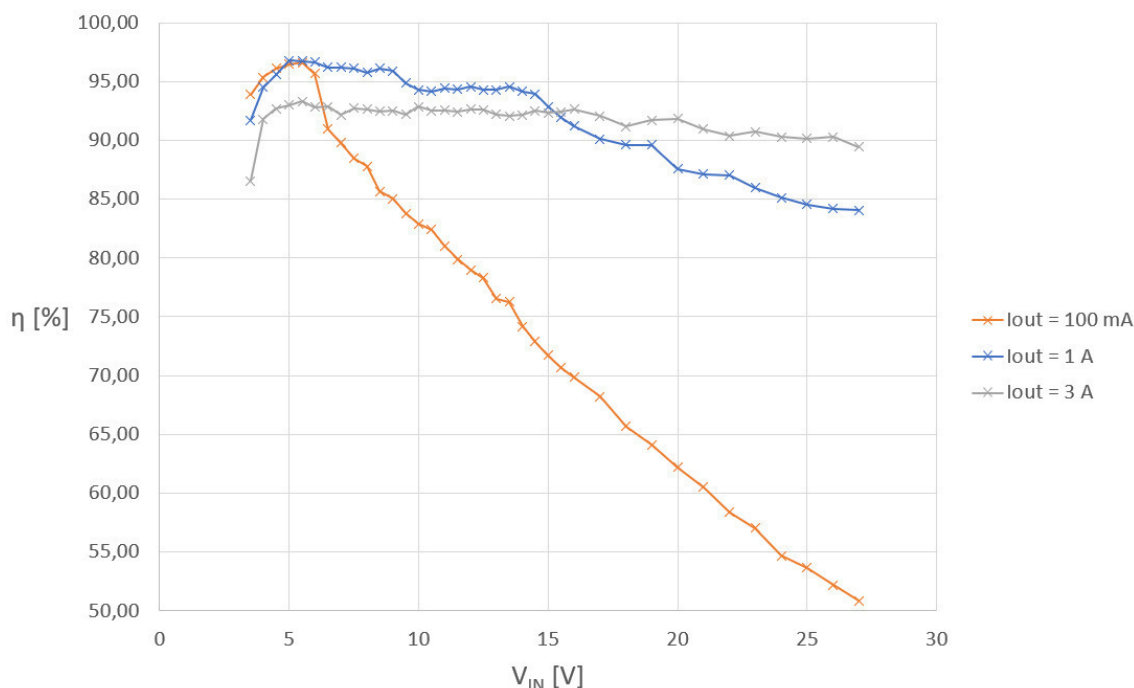
Z obrázků je patrné, že nedochází k žádným oscilacím, či zákrmitům, měnič tedy v celém svém funkčním rozsahu pracuje správně.

Závislost výstupního napětí na vstupním napětí je zobrazena na obrázku č. 6.3. Ze závislosti je patrné, že měnič v rozsahu 7 – 27 V dokáže dodávat konstantní napětí. V tomto případě by to mělo být 6 V, čehož se nepodařilo úplně přesně dosáhnout. Při odebíraném proudu 100 mA je hodnota výstupního napětí 5,97 V, při 1 A je to 5,95 V a při maximálním odebíraném proudu, tedy 3 A je na výstupu napětí 5,93 V. V grafu můžeme také vidět, že měnič pracuje již od 3,5 V a při této hodnotě dokáže na výstupu držet napětí 3,4 V při 100 mA odebíraného proudu, 3,3 V při 1 A odebíraného proudu a 3,1 V při 3 A proudu na zátěži.



Obrázek 6.3 Závislost výstupního napětí na vstupním napětí pro různé proudy

Závislost účinnosti na vstupním napětí je zobrazena na obrázku č. 6.4. Z grafu je patrné, že měnič dosahuje nejvyšší účinnosti při nižších hodnotách vstupního napětí a při vyšších odebíraných proudech. V pracovním rozsahu měniče 9 – 16 V vstupního napětí a odebíraném proudu 1 A se účinnost pohybuje nad 90 %, což je vyhovující hodnota.



Obrázek 6.4 Závislost účinnosti na vstupním napětí

6.2 Vybrané testy inspirované normou

V této kapitole bylo zařízení vyzkoušeno vybranými testy inspirovanými normou VW80000. Předmětem sledování je, jaký vliv mají jednotlivé testy na výstupní napětí. Dle normy a běžných požadavků zákazníků byly definovány tři stavy, které mohou nastat: status A, B a C.

Status A: Testované zařízení musí během testu a po testu bezchybně fungovat. Změna výstupního napětí během testu dosahuje velikosti do 20 % od nominální hodnoty. V případě toho zařízení to znamená, že hodnota výstupního napětí během testu se pohybuje v rozmezí 4,8 V až 7,2 V.

Status B: Testované zařízení musí během testu a po testu fungovat. Jedna nebo více funkcí tohoto zařízení může během testu zaznamenat změnu, ale po ukončení testu se musí zařízení vrátit do statusu A. Změna výstupního napětí během testu dosahuje velikosti do 60 % od nominální hodnoty. V případě toho zařízení to znamená, že hodnota výstupního napětí během testu se pohybuje v rozmezí 2,4 V až 9,6 V.

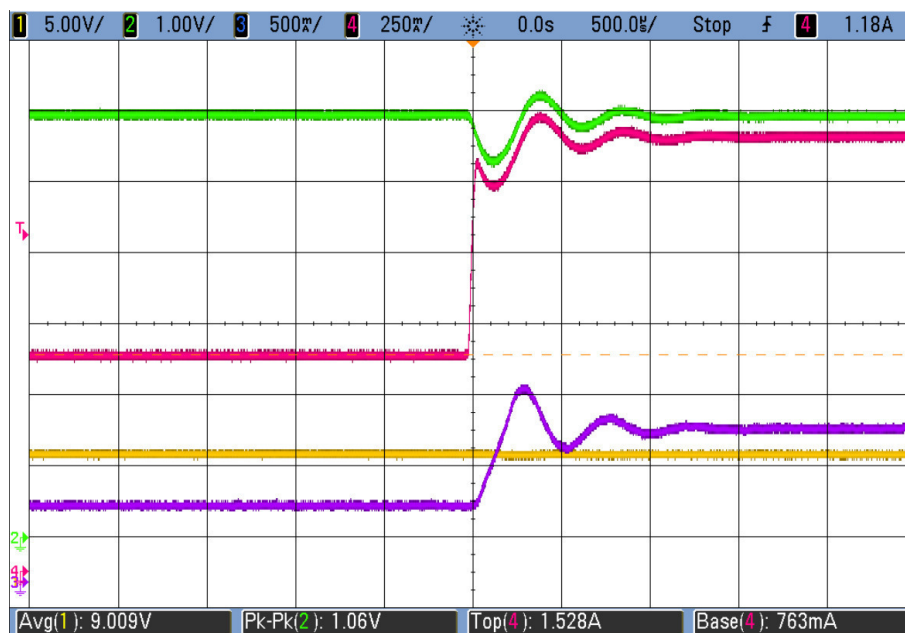
Status C: Testované zařízení může během testu vypovědět svoji funkci, ale po ukončení testu se musí vrátit do statusu A. Změna výstupního napětí během testu dosahuje velikosti přesahující 60 % od nominální hodnoty. V případě toho zařízení to znamená, že hodnota výstupního napětí během testu se pohybuje mimo rozmezí 2,4 V až 9,6 V.

6.2.1 Test č.1 – odezva na skokovou změnu odebíraného proudu

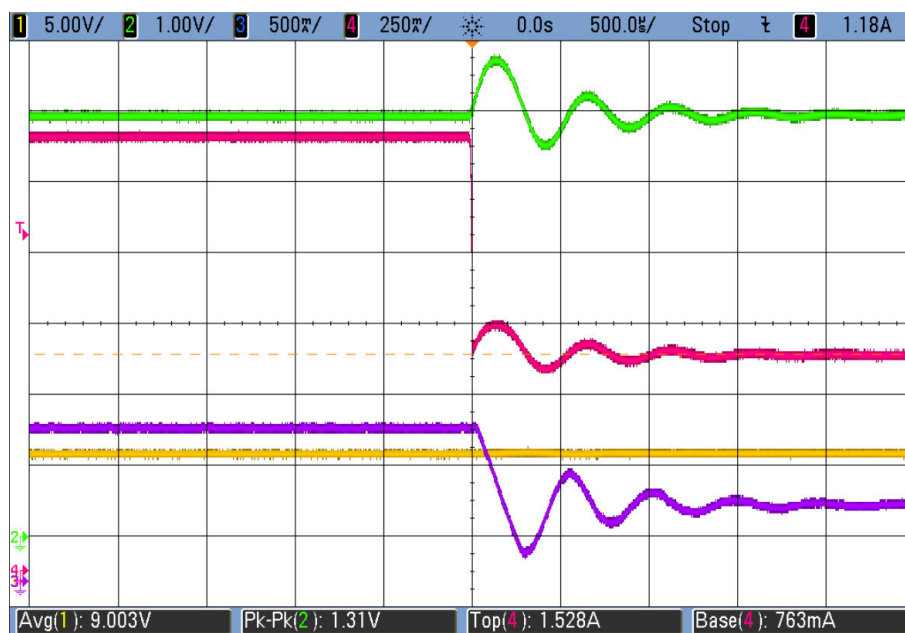
Test byl uskutečněn pro 3 hodnoty vstupního napětí: 9 V, 13,5 V a 16 V. Změna odebíraného proudu byla realizována pomocí spínače ovládaného generátorem, který

paralelně k zátěži připojoval, resp. odpojoval další odpor. Náběžná a sestupná hrana spínače byla o délce 10 μ s. Změna výstupního proudu byla z 1,5 A na 0,75 A a zpět.

Na obrázcích č. 6.5 a č. 6.6 je vidět test se vstupním napětím 9 V. Při skokové změně výstupního proudu z 0,75 A na 1,5 A dochází ke zvlnění výstupního napětí 1,06 V. Při skokové změně výstupního proudu z 1,5 A na 0,75 A dochází ke zvlnění výstupního napětí 1,31 V.

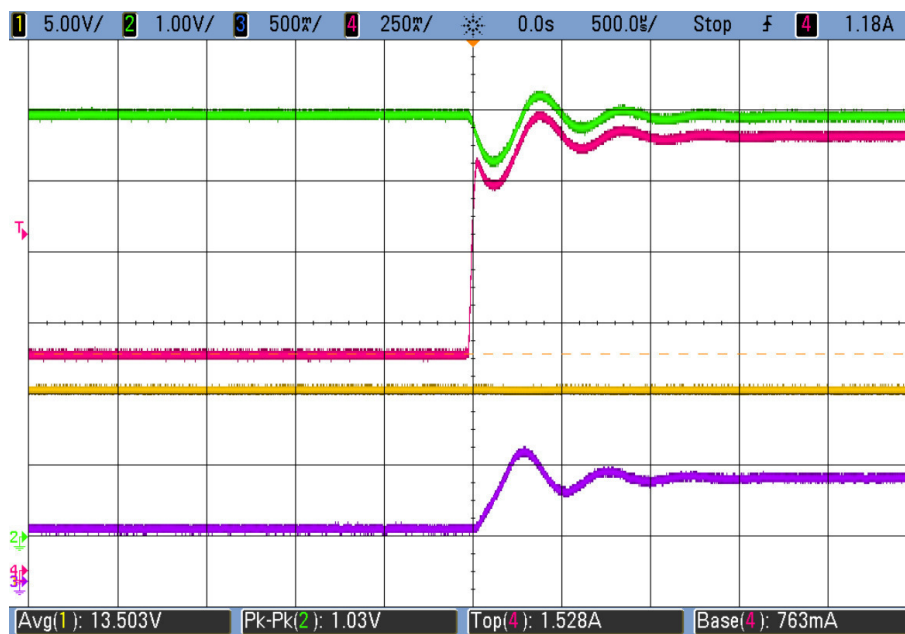


Obrázek 6.5 Test č.1 – změna nahoru, 9 V, Výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.

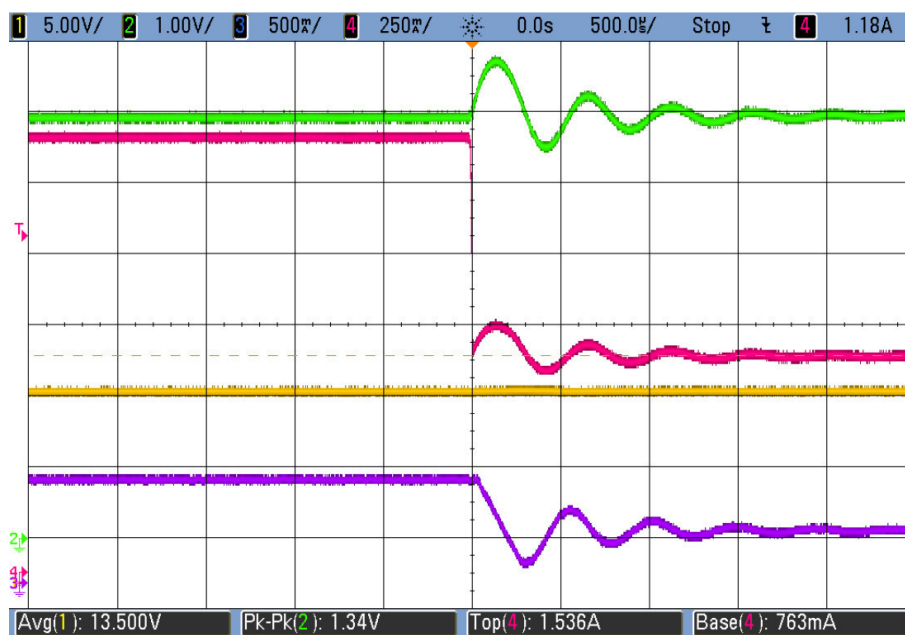


Obrázek 6.6 Test č.1 – změna dolů, 9 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.

Na obrázcích č. 6.7 a č. 6.8 je vidět test se vstupním napětím 13,5 V. Při skokové změně výstupního proudu z 0,75 A na 1,5 A dochází ke zvlnění výstupního napětí 1,03 V. Při skokové změně výstupního proudu z 1,5 A na 0,75 A dochází ke zvlnění výstupního napětí 1,34 V.

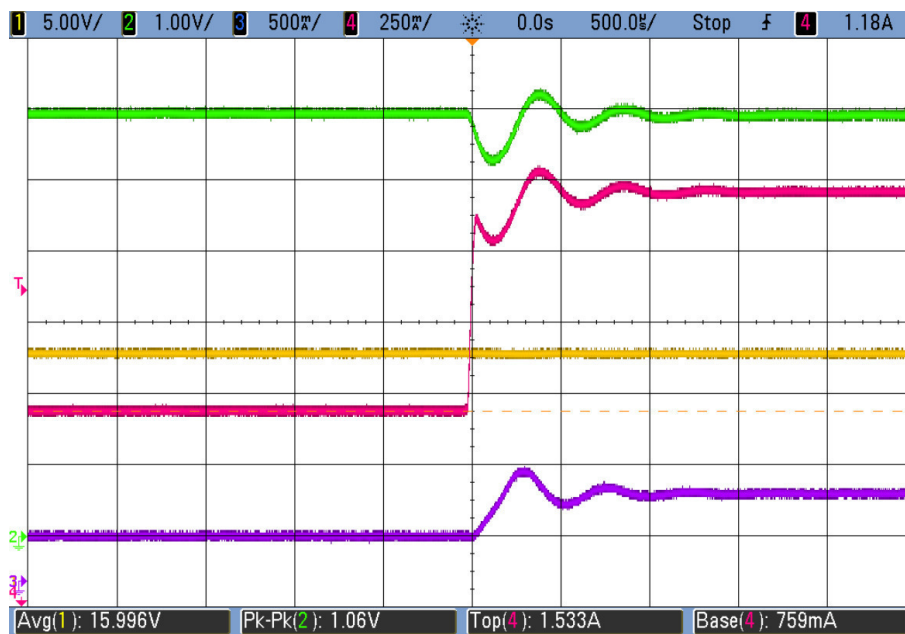


Obrázek 6.7 Test č.1 – změna nahoru, 13,5 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.

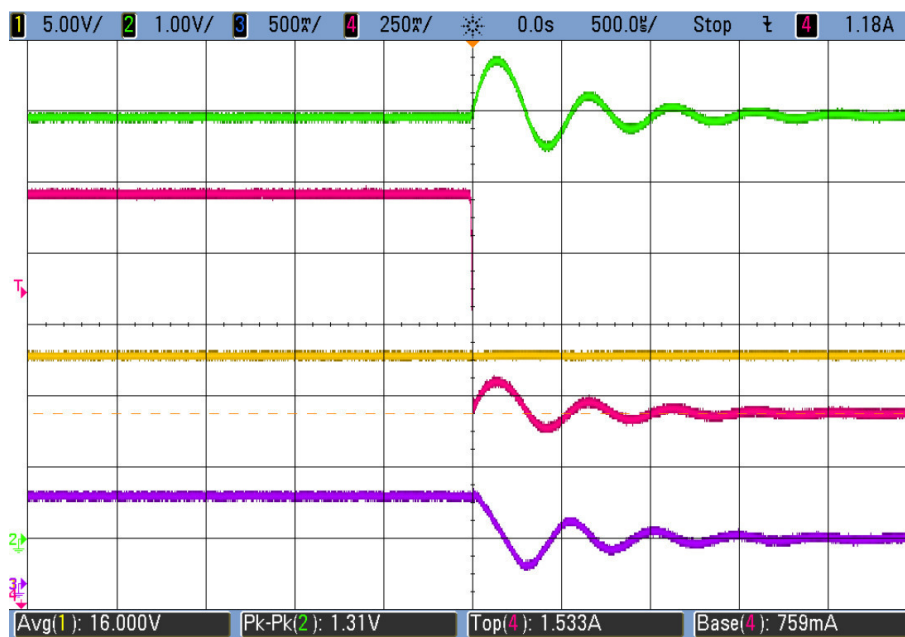


Obrázek 6.8 Test č.1 – změna dolů, 13,5 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.

Na obrázcích č. 6.9 a č. 6.10 je vidět test se vstupním napětím 16 V. Při skokové změně výstupního proudu z 0,75 A na 1,5 A ke zvlnění výstupního napětí 1,06 V. Při skokové změně výstupního proudu z 1,5 A na 0,75 A dochází ke zvlnění výstupního napětí 1,31 V.



Obrázek 6.9 Test č.1 – změna nahoru, 16 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.



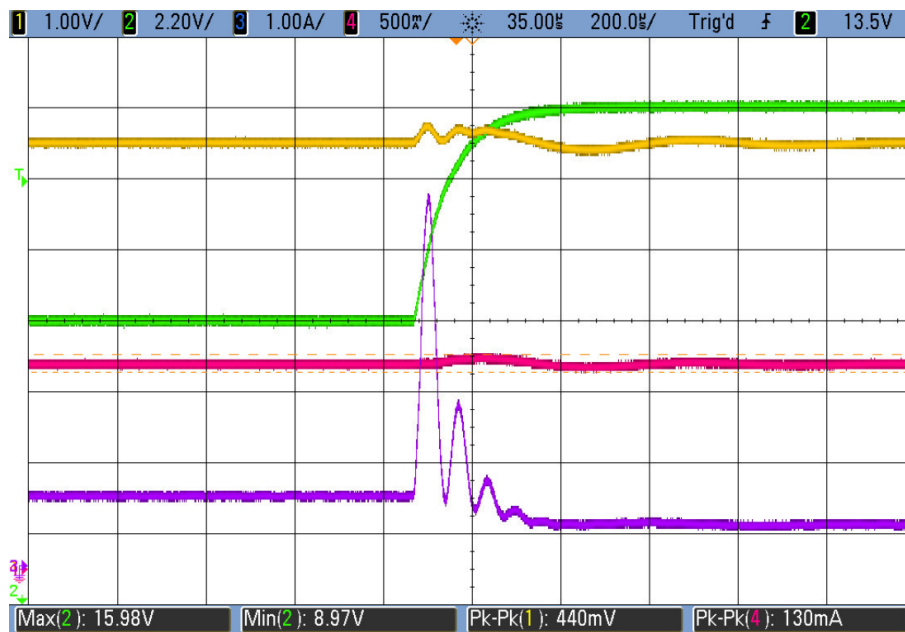
Obrázek 6.10 Test č.1 – změna dolů, 16 V, výstupní napětí je znázorněno zeleným průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí žlutým, vstupní proud fialovým.

Zvlnění je pravděpodobně způsobeno ne zcela odladěným kompenzačním polem. Z výsledků je patrné, že velikost vstupního napětí nemá na velikost zvlnění výstupního napětí vliv. Při skokové změně výstupního proudu směrem nahoru je zvlnění výstupního napětí nižší, než skokové změně směrem dolů. V případě změny směrem nahoru se zvlnění ustálilo po uplynutí přibližně 1,5 ms, u změny směrem dolů došlo k ustálení zvlnění po přibližně 2 ms. Je také vidět, že hodnota výstupního napětí se ve všech případech pohybovala v rozmezí 4,8 až 7,2 V, tudíž zařízení v tomto testu obstálo se statusem A, což norma také požaduje.

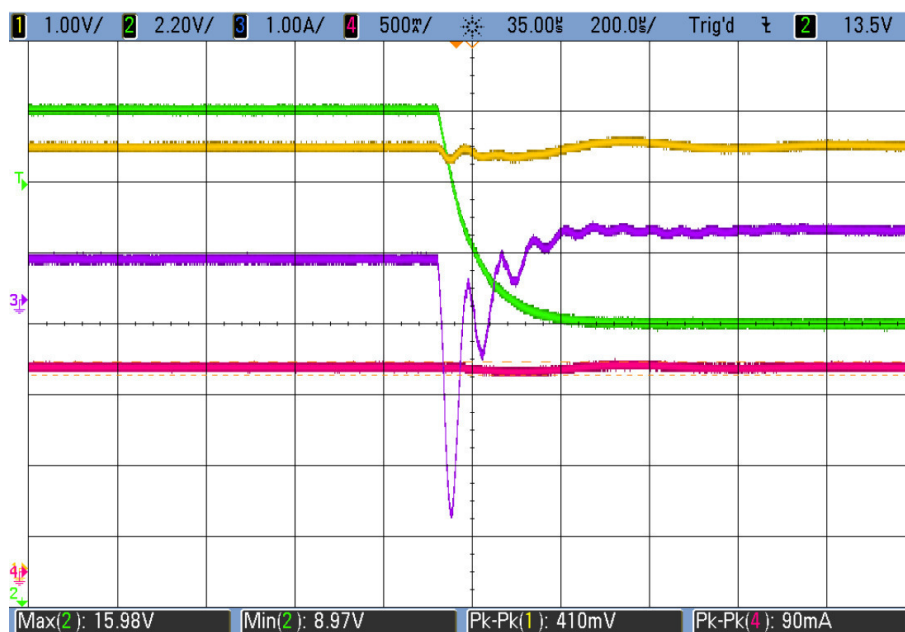
6.2.2 Test č.2 - Odezva na změnu vstupního napětí 9 – 16 V

Test byl uskutečněn pro odebírané proudy 1,5 A a 3 A. Puls byl generován pomocí stejnosměrného zdroje a generátoru.

Na obrázcích č. 6.11 a č. 6.12 je vidět tento test pro odebíraný proud 1,5 A. Při skokové změně vstupního napětí z 9 V na 16 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,44 V, což je přibližně 7,3 % nominální hodnoty. Při skokové změně vstupního napětí z 16 V na 9 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,41 V, což je přibližně 6,8 % nominální hodnoty.

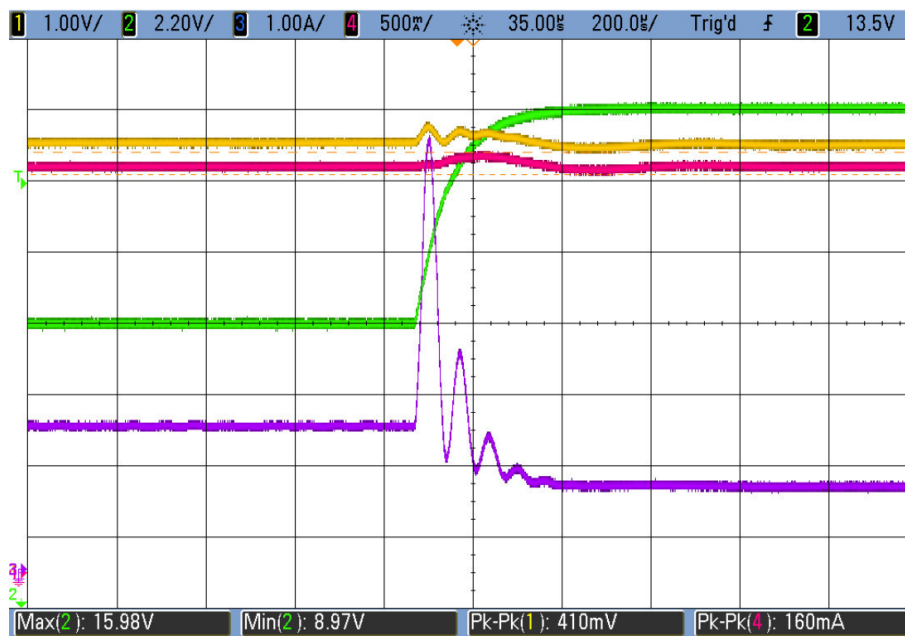


Obrázek 6.11 Test č.2 – změna nahoru, 1,5 A, Výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

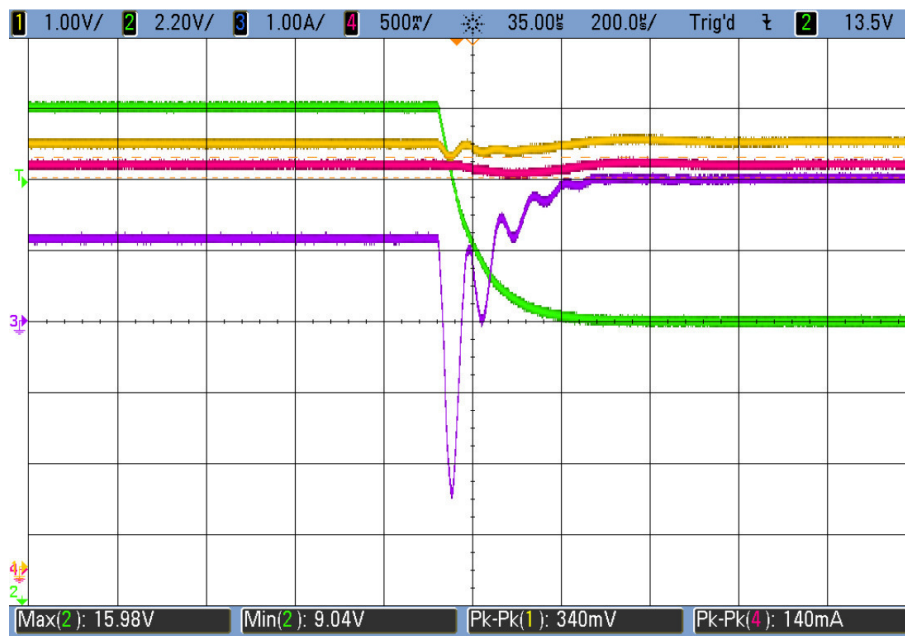


Obrázek 6.12 Test č.2 – změna dolů, 1,5 A, Výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

Na obrázcích č. 6.13 a č. 6.14 je vidět tento test pro odebíraný proud 3 A. Při skokové změně vstupního napětí z 9 V na 16 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,41 V, což je přibližně 6,8 % nominální hodnoty. Při skokové změně vstupního napětí z 16 V na 9 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,34 V, což je přibližně 5,7 % nominální hodnoty.



Obrázek 6.13 Test č.2 – změna nahoru, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým



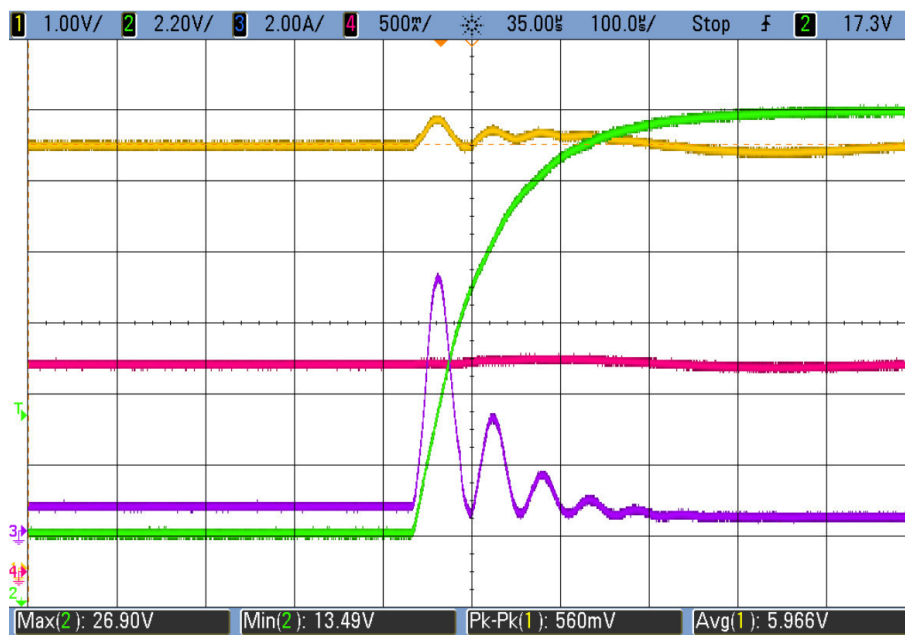
Obrázek 6.14 Test č.2 – změna dolů, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

Z výsledků je vidět, že zvlnění se s odlišnými odebíranými proudy příliš neliší. Je také vidět, že hodnota výstupního napětí se ve všech případech pohybovala v rozmezí 4,8 až 7,2 V, tudíž zařízení v tomto testu obstálo se statusem A, což norma požaduje.

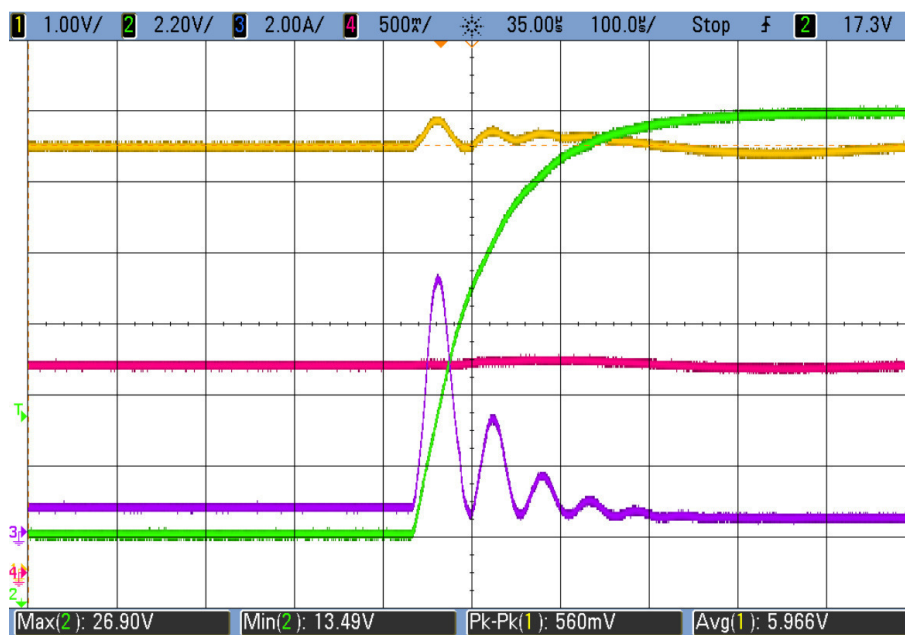
6.2.3 Test č.3 - Odezva na změnu vstupního napětí 13,5 – 27 V

Test byl uskutečněn pro odebírané proudy 1,5 A a 3 A. Puls byl generován pomocí stejnosměrného zdroje a generátoru.

Na obrázcích č. 6.15 a č. 6.16 je vidět tento test pro odebíraný proud 1,5 A. Při skokové změně vstupního napětí z 13,5 V na 27 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,56 V, což je přibližně 9,3 % nominální hodnoty. Při skokové změně vstupního napětí z 27 V na 13,5 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,47 V, což je přibližně 7,8 % nominální hodnoty.

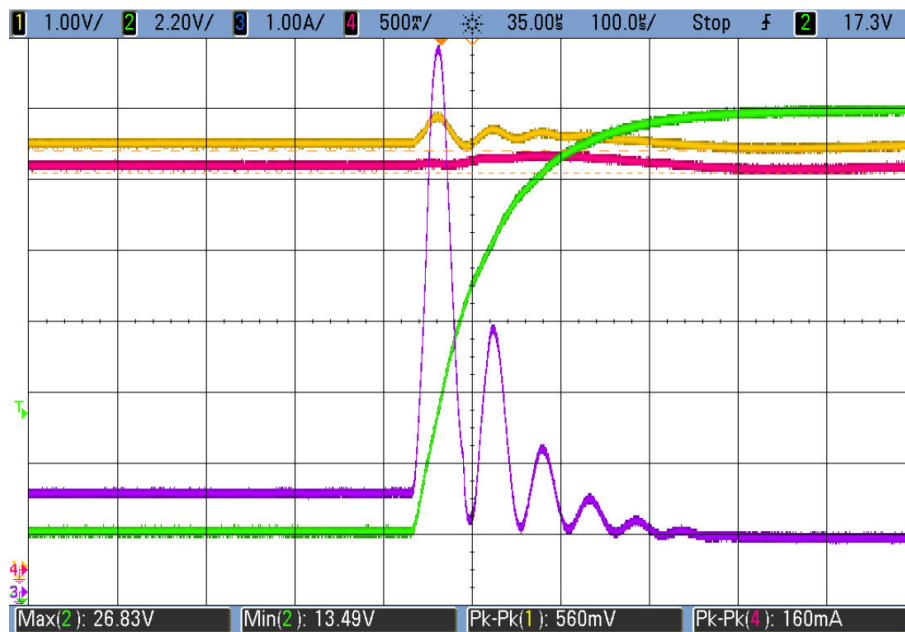


Obrázek 6.15 Test č.3 – změna nahoru, 1,5 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

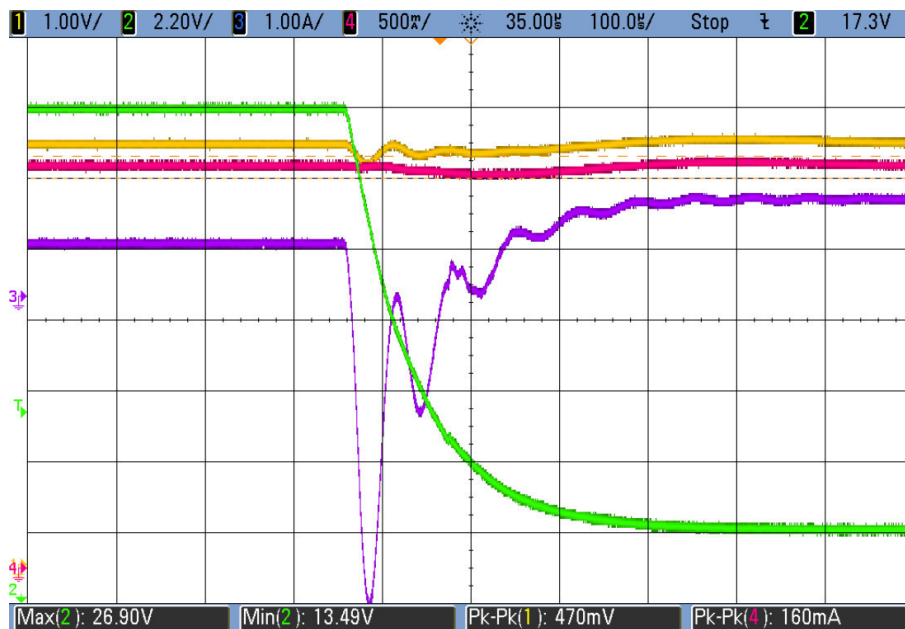


Obrázek 6.16 Test č.3 – změna dolů, 1,5 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

Na obrázcích č. 6.17 a č. 6.18 je vidět tento test pro odebíraný proud 3 A. Při skokové změně vstupního napětí z 13,5 V na 27 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,56 V, což je přibližně 9,3 % nominální hodnoty. Při skokové změně vstupního napětí z 27 V na 13,5 V dochází ke zvlnění výstupního napětí 0,47 V, což je přibližně 7,8 % nominální hodnoty.



Obrázek 6.17 Test č.3 – změna nahoru, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

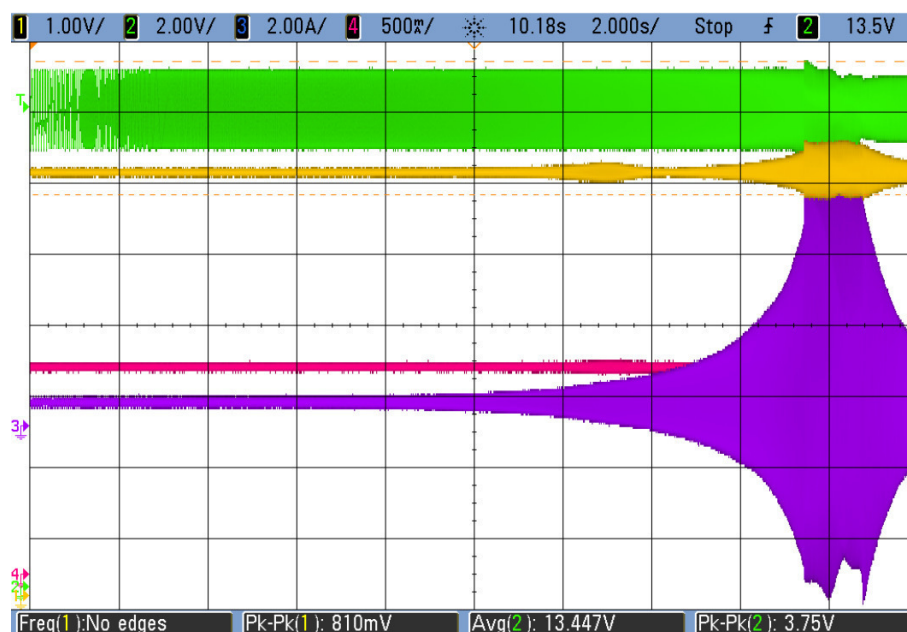


Obrázek 6.18 Test č.3 – změna dolů, 3 A, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

Z výsledků je vidět, že zvlnění se s odlišnými odebíranými proudy neliší. Je také vidět, že hodnota výstupního napětí se ve všech případech pohybovala v rozmezí 4,8 až 7,2 V, tudíž zařízení v tomto testu obstálo se statusem A, což norma požaduje.

6.2.4 Test č.4 – Vliv rušení o frekvencích 15 Hz – 30 kHz

Při tomto testu bylo na vstup přivedeno stejnosměrné napětí o velikosti 13,5 V a k tomu sinusový signál o hodnotě 2 V_{p-p}. Pomocí generátoru bylo provedeno rozmítání frekvence od 15 Hz do 30 kHz. Výsledek tohoto testu je vidět na obrázku č. 6.19. Je vidět, že v určitých frekvencích dochází k rozkmitání, které způsobuje zvlnění na výstupním napětí o velikosti 0,81 V, což odpovídá 13,5 % nominální hodnoty.



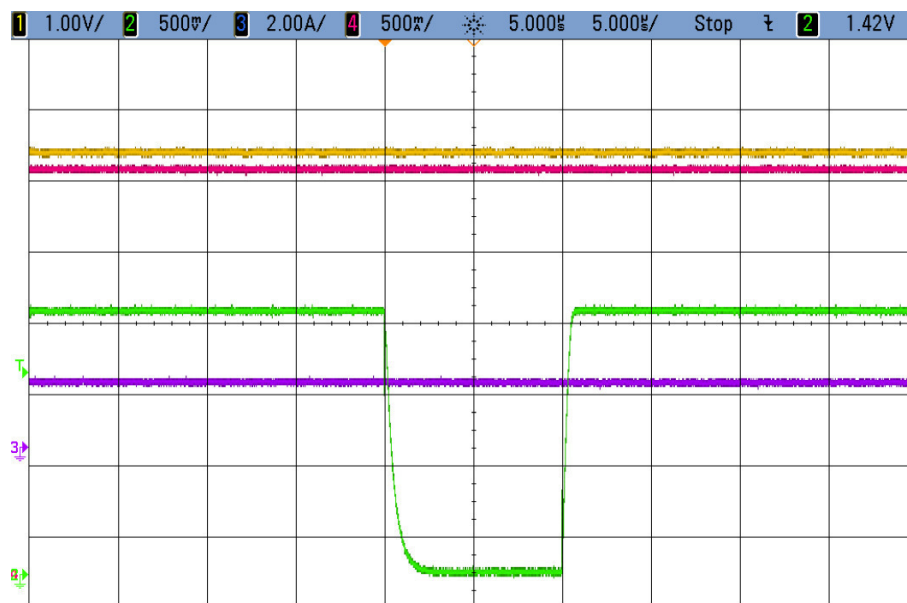
Obrázek 6.19 Test č.4 – Vliv rušení na výstupní napětí, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní napětí zeleným, vstupní proud fialovým

Při proměření bylo zjištěno, že zvlnění vzniká na frekvencích od 11 kHz do 20 kHz. Tento je pravděpodobně způsoben chybou při návrhu vstupního filtru. Na vině může být také ne zcela odladěné kompenzační pole. I přes toto zvlnění se hodnota výstupního napětí pohybuje v rozmezí 4,8 až 7,2 V, tudíž zařízení v tomto testu obstálo se statusem A, což norma požaduje.

6.2.5 Test č.5 – Vliv krátkodobého přerušení vstupního napětí

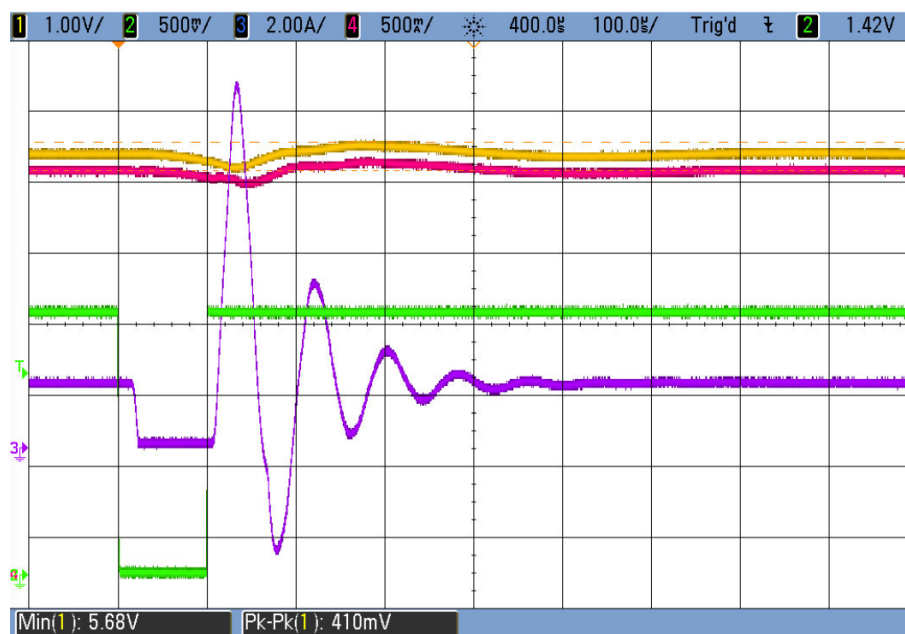
Při tomto testu bylo přerušováno vstupní napětí o velikosti 11 V. Měření proběhlo pro přerušení o délce 10 μs, 100 μs, 1 ms, 10 ms, 100 ms. Přerušení byla realizována pomocí spínače, který byl spínán pomocí pulsního signálu vytvořeného generátorem. Tento spínač propouštěl napětí od zdroje na vstup testovaného zařízení.

Na obrázku č. 6.20 je znázorněno přerušení vstupního napětí o délce 10 μs. Je vidět, že takové krátké přerušení nemá na výstupní napětí žádný vliv.



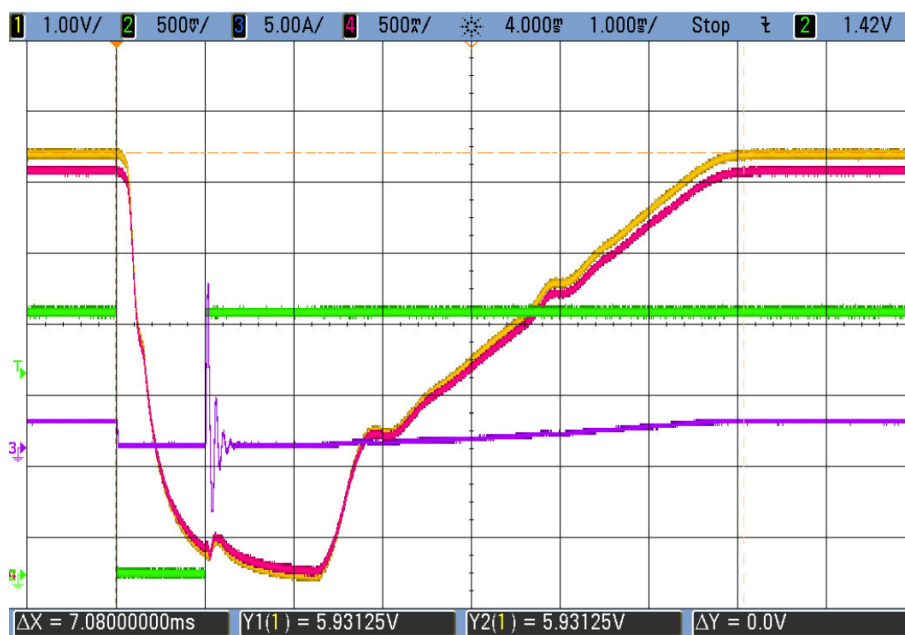
Obrázek 6.20 Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 10 μ s, Výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje k měniči.

Na obrázku č. 6.21 je znázorněno přerušení vstupního napětí o délce 100 μ s. Je vidět, že toto přerušení už vyvolalo mírné zvlnění výstupního napětí o velikosti 0,41 V, což odpovídá přibližně 6,8 % nominální hodnoty.



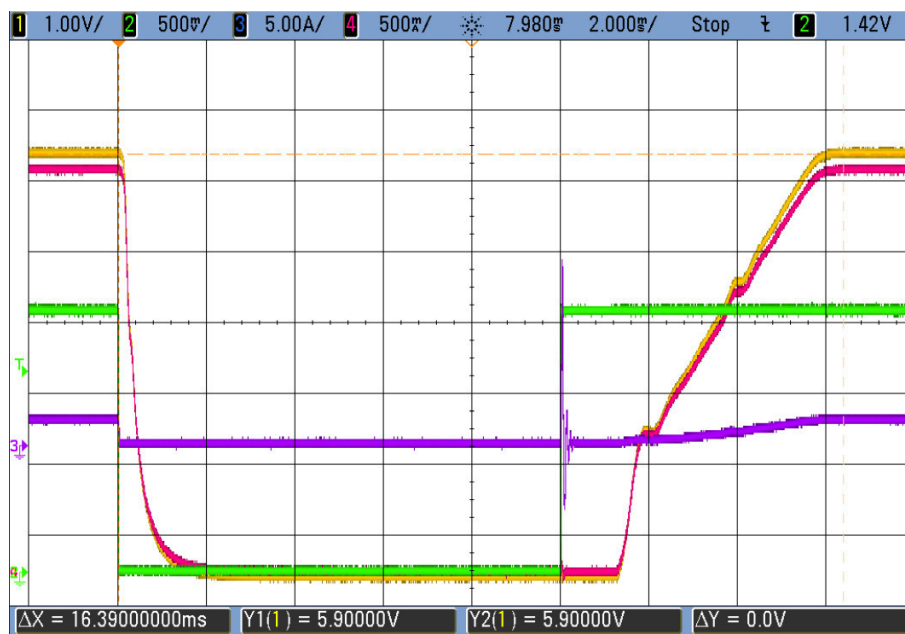
Obrázek 6.21 Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 100 μ s, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje k měniči.

Na obrázku č. 6.22 je znázorněno přerušení vstupního napětí o délce 1 ms. Je vidět, že toto přerušení už zapříčinilo, že výstupní napětí spadlo na nulovou hodnotu a po nárůstu vstupního napětí znovu vzrostlo na 6 V za přibližně 6 ms.



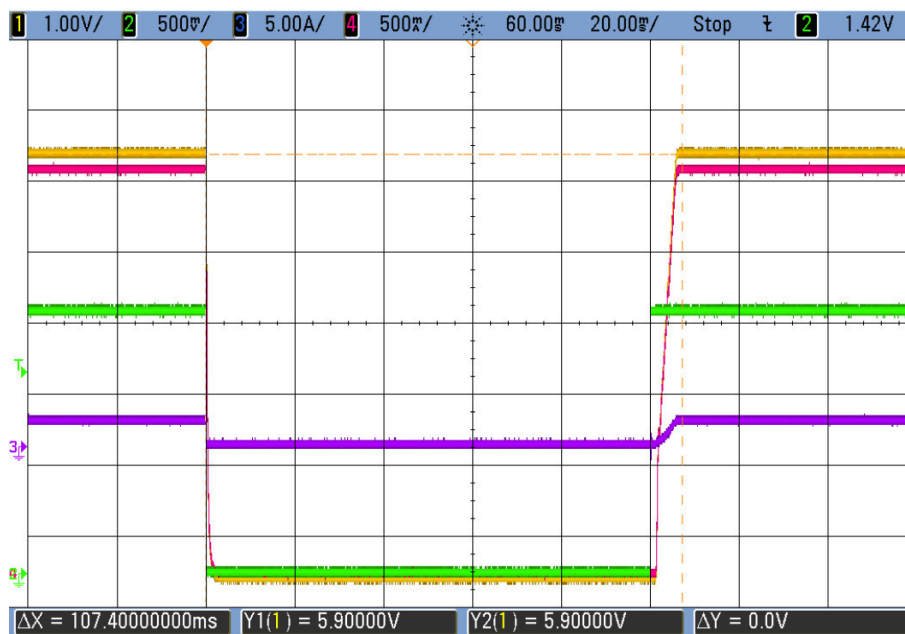
Obrázek 6.22 Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 1 ms, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouští napětí ze zdroje.

Na obrázku č. 6.23 je znázorněno přerušení vstupního napětí o délce 10 ms. Je vidět, že toto přerušení už zapříčinilo, že výstupní napětí spadlo na nulovou hodnotu a po nárůstu vstupního napětí znovu vzrostlo na 6 V za přibližně 6 ms.



Obrázek 6.23 Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 10 ms, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouští napětí ze zdroje k měniči.

Na obrázku č. 6.24 je znázorněno přerušení vstupního napětí o délce 100ms. Je vidět, že toto přerušení už zapříčinilo, že výstupní napětí spadlo na nulovou hodnotu a po nárůstu vstupního napětí znovu vzrostlo na 6 V za přibližně 6 ms. Zařízení v této části testu obstálo se statusem C.



Obrázek 6.24 Test č.5 – Přerušení vstupního napětí o délce 100 ms, výstupní napětí je znázorněno žlutým průběhem, výstupní proud červeným průběhem, vstupní proud fialovým, zeleným průběhem není znázorněno vstupní napětí, ale napětí, kterým byl spínán spínač, který propouštěl napětí ze zdroje k měniči.

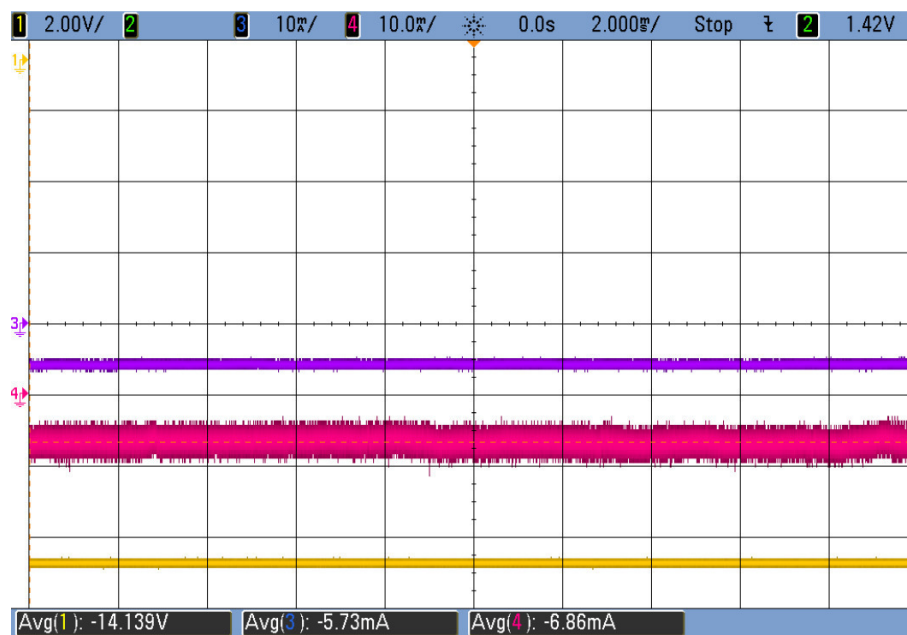
Z obrázků je patrné, že hodnota vstupního napětí se při přerušení o délce 10 μ s a 100 μ s pohybuje v rozsahu 4,8 až 7,2 V, zařízení tedy v těchto podmínkách obstálo se statusem A. Při přerušení o délce větší než 100 μ s již dojde k poklesu napětí na nulu, zařízení tedy v těchto podmínkách plní status C.

Požadavkem u těchto testů bylo dosáhnout statusu A při přerušení o délce do 100 μ s. Toho se u testovaného zařízení podařilo dosáhnout. U delších přerušení už je požadavek pouze na status C, tedy, že se po přerušení obvod vrátí do pracovního stavu. Toho se také podařilo dosáhnout.

6.2.6 Test č.6 – Obrácení polarity vstupního napětí

V tomto testu bylo na vstup zařízení přivedeno záporné napětí o velikosti 14 V. Cílem testu bylo zjistit, zda funguje ochrana vůči obrácení polarity.

Na obrázku č. 6.25 je vidět, že zařízení při záporném napětí na vstupu neodebírá téměř žádný proud a zároveň nedošlo k jeho poškození. Malý odběr proudu má na svědomí rezistor na vstupu o hodnotě odporu 10 k Ω , ale naměřená hodnota 5,73 mA je nejspíše způsobena chybou proudové sondy.



Obrázek 6.25 Test č.6 – Obrácení polarity vstupního napětí, žlutý průběh znázorňuje vstupní napětí, červený znázorňuje výstupní proud, fialový znázorňuje vstupní proud.

Po otočení polarity zpět bylo zařízení opět funkční, dá se tedy říct, že testem prošlo se statusem C, což je také požadavek normy.

6.2.7 Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení

V tomto testu byly zkratovány výstupní svorky zařízení při vstupním napětí o velikosti 16 V. Cílem testu bylo ověřit funkci ochrany integrovaného obvodu LM25141 vůči zkratování výstupních svorek.

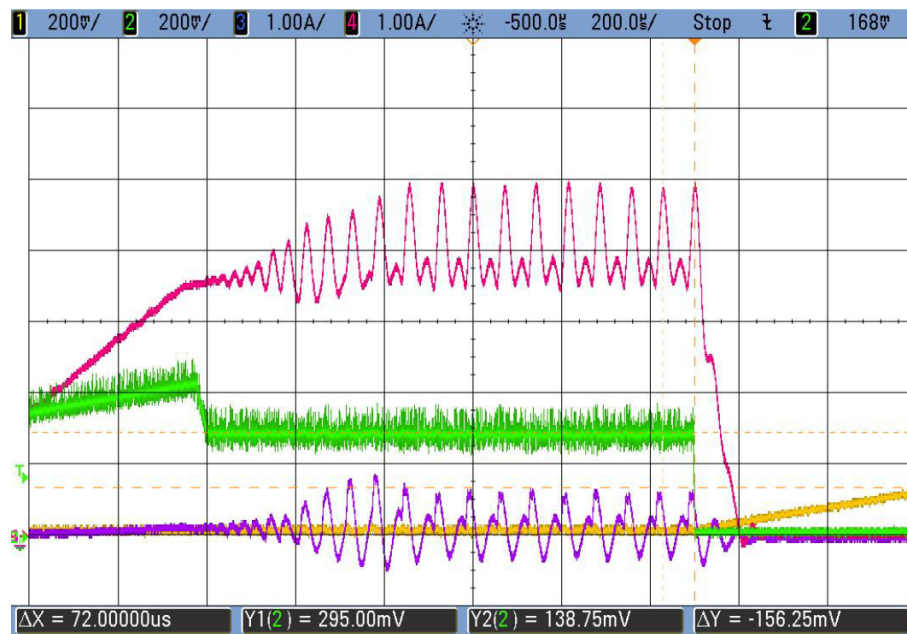
Na obrázku č. 6.26 je vidět oscilogram, který zaznamenává průběhy napětí a proudů během zkratu.



Obrázek 6.26 Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení, žlutý průběh znázorňuje napětí na pinu RES, zelený průběh napětí na pinu SS, červený průběh znázorňuje výstupní proud, fialový průběh znázorňuje vstupní proud.

Při připojení vstupního napětí se nejprve začne nabíjet kondenzátor na pinu SS, který má na starosti soft-start funkci. Jakmile je na něm napětí přibližně 200 mV, měnič se spustí a do zkratu začne téct proud. Když proud na snímacím odporu dosáhne limitní hodnoty, v našem případě je to necelých 5 A, spustí se ochrana. Každých 32 cyklů obvod testuje, jestli je pořád proud na výstupu na limitní hodnotě, pokud ano, tak ho mírně sníží a čeká dalších 32 cyklů. Jakmile délka této činnosti přesáhne 512 cyklů, měnič zastaví svou funkci. Poté se nabíjí kondenzátor na pinu RES, který má na starosti restart obvodu. Jakmile je na něm napětí 1,2 V, kondenzátor se vybije a začne znovu nabíhat soft-start.

Pro ověření je tu obrázek č. 6.27, kde můžeme vidět periodu mezi testováním vysokého proudu obvodem, a obrázek č. 6.28, kde můžeme vidět délku celé této činnosti, která by měla odpovídat 512 cyklům. Jeden cyklus odpovídá periodě spínání, tedy hodnotě $1/440k = 2,27 \mu s$. 32 Cyklů poté trvá $72,73 \mu s$ a 512 cyklů $1,16 ms$. Tyto hodnoty přibližně odpovídají hodnotám naměřeným pomocí kurzorů, což můžeme vidět na následujících obrázcích.



Obrázek 6.27 Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení, 32 cyklů, žlutý průběh znázorňuje napětí na pinu RES, zelený průběh napětí na pinu SS, červený průběh znázorňuje výstupní proud, fialový průběh znázorňuje vstupní proud.

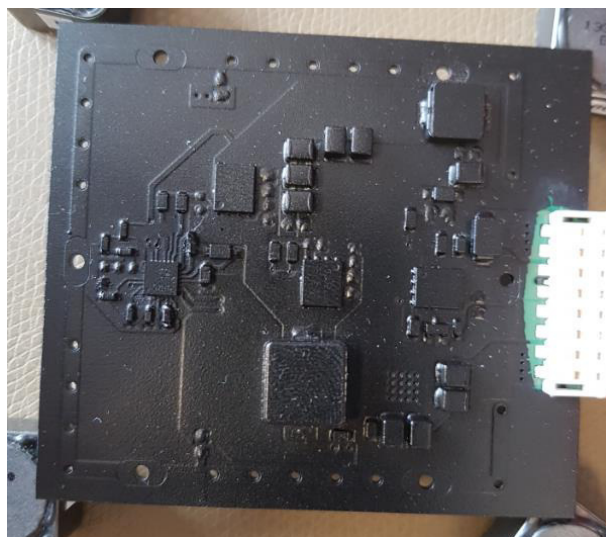


Obrázek 6.28 Test č.7 – Zkrat na výstupu zařízení, 512 cyklů, žlutý průběh znázorňuje napětí na pinu RES, zelený průběh napětí na pinu SS, červený průběh znázorňuje výstupní proud, fialový průběh znázorňuje vstupní proud.

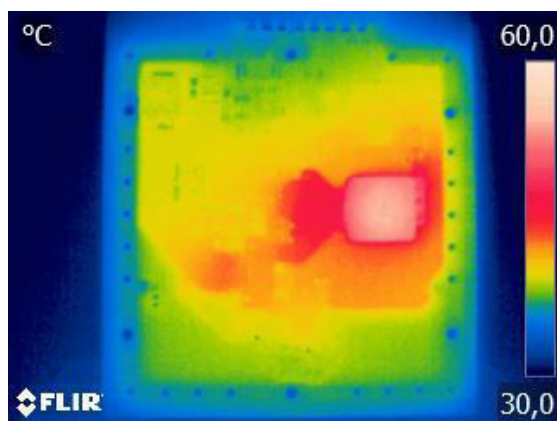
Jakmile došlo k přerušení zkratu výstupních svorek, zařízení opět obnovilo svoji funkci. V tomto testu tedy obstálo se statusem C, což norma požaduje.

6.3 Teplotní poměry na zařízení

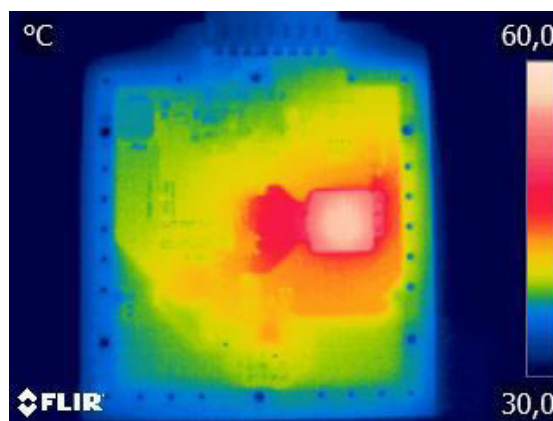
Pomocí termokamery byly změřeny teploty na desce plošných spojů při vstupních napětích 9 V a 16 V. Měření bylo zaměřeno na výkonové součástky, tedy na spínací tranzistory, cívku, ale také na integrovaný obvod. Aby vyzařování tepla kamera snímala u všech součástek stejně, bylo zapotřebí celý měnič přestříkat na černo. Měřené zařízení je zobrazeno na obrázku č. 6.29.



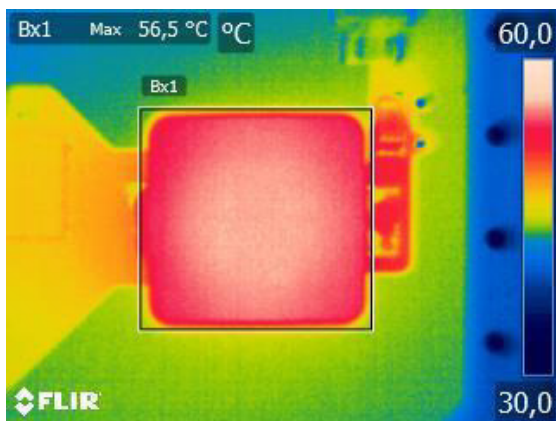
Obrázek 6.29 Vzorek připravený pro měření teplotních poměrů



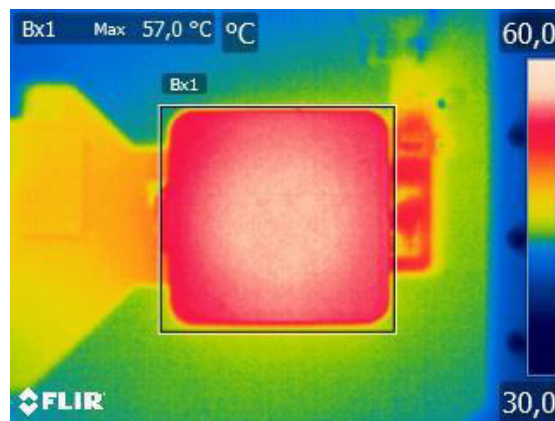
Obrázek 6.30 Celá deska při napětí 9 V



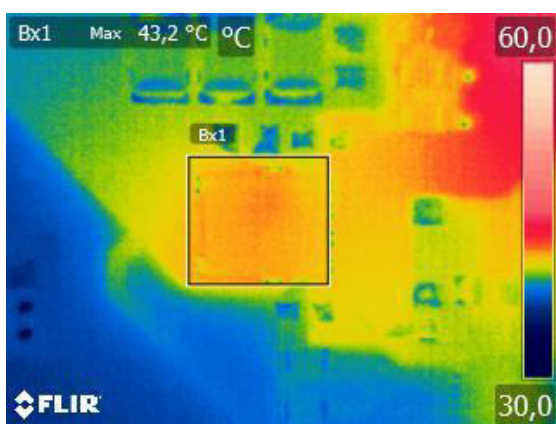
Obrázek 6.31 Celá deska při napětí 16 V



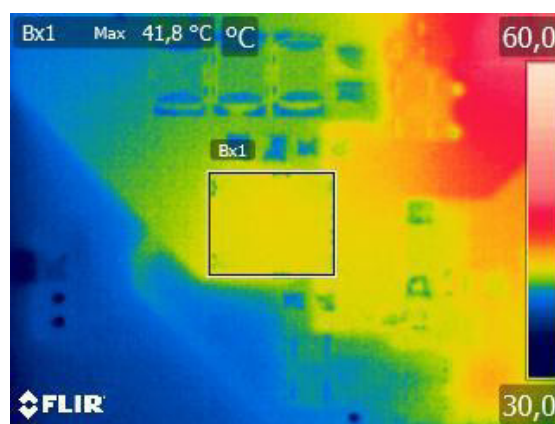
Obrázek 6.32 Cívka při napětí 9 V



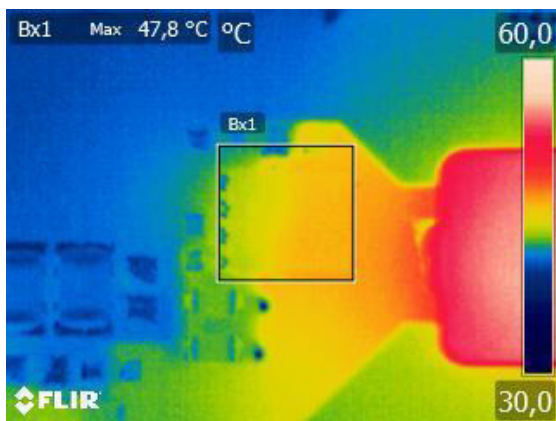
Obrázek 6.33 Cívka při napětí 16 V



Obrázek 6.34 Horní MOSFET při napětí 9 V



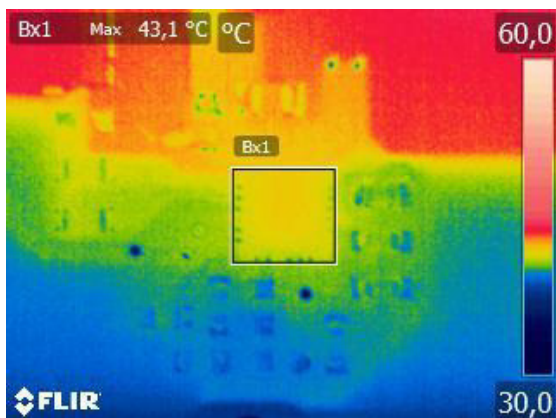
Obrázek 6.35 Horní MOSFET při napětí 16 V



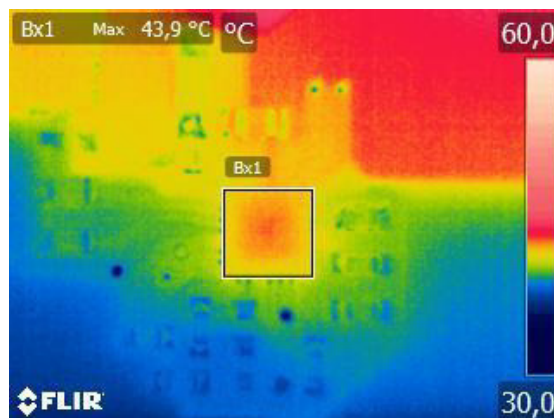
Obrázek 6.36 Dolní MOSFET při napětí 9 V



Obrázek 6.37 Dolní MOSFET při napětí 16 V



Obrázek 6.38 IO při napětí 9 V



Obrázek 6.39 IO při napětí 16 V

V tabulce č. 6.1 je vidět ohřev výkonových součástek ΔT , což je teplota okolí odečtená od teploty součástky. Teplota okolí byla 23 °C.

Tabulka 6.1 Ohřev výkonových součástek

V_{IN} [V]	9	16
ΔT cívky [K]	33,5	34
ΔT horního MOSFETU [K]	20,2	18,8
ΔT dolního MOSFETU [K]	24,8	29,8
ΔT integrovaného obvodu [K]	20,1	20,9

Z obrázků a tabulky je vidět, že nejvíce se zahřívá cívka, s tím, že mezi vstupním napětím 9 V a 16 V není znatelný rozdíl. U horního MOSFETU se očekává, že se bude více zahřívát při nižším vstupním napětí, protože tehdy setrvává déle v otevřeném stavu. Ve skutečnosti tomu tak opravdu je, ovšem rozdíl není příliš velký. U dolního MOSFETU by tomu mělo být opačně. A podle snímků tomu tak je, rozdíl je tu větší, než tomu bylo u horního tranzistoru. Integrovaný obvod se zahřívá více při větším vstupním napětí.

6.4 Elektromagnetické emise

Měření elektromagnetických emisí proběhlo ve stíněné komoře při teplotě 23,8 °C. Bylo změřeno rušení generované zařízením do vodiče (CE) a rušení generované do okolí (RE). Měníč byl pro toto měření osazen tuner boxem, kondenzátory k tuner boxu (C28, C29, C30) o kapacitě 100 nF a rezistory na spínání tranzistoru (R5, R8) o odporu 4,75 Ω.

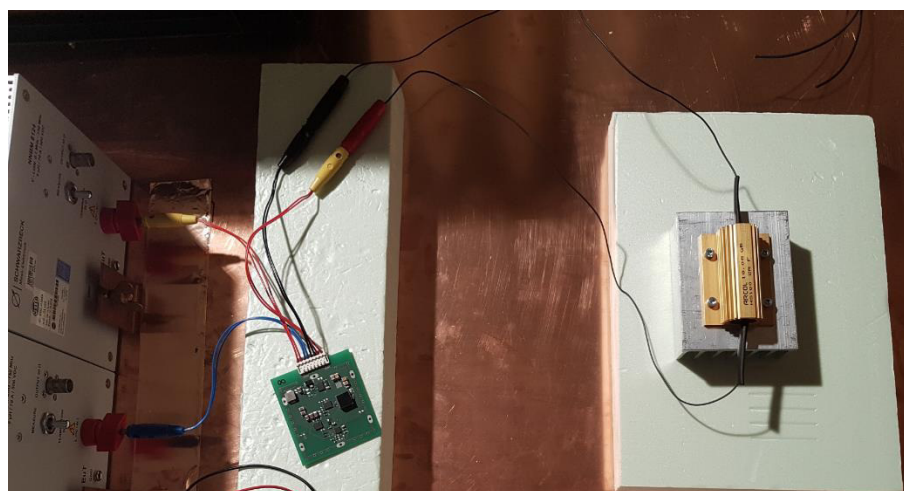
6.4.1 Rušení generované do vodiče

Bylo otestováno, zda zařízení splňuje základní limity dané normou TL-81000, které můžeme vidět v tabulce č. 6.2.

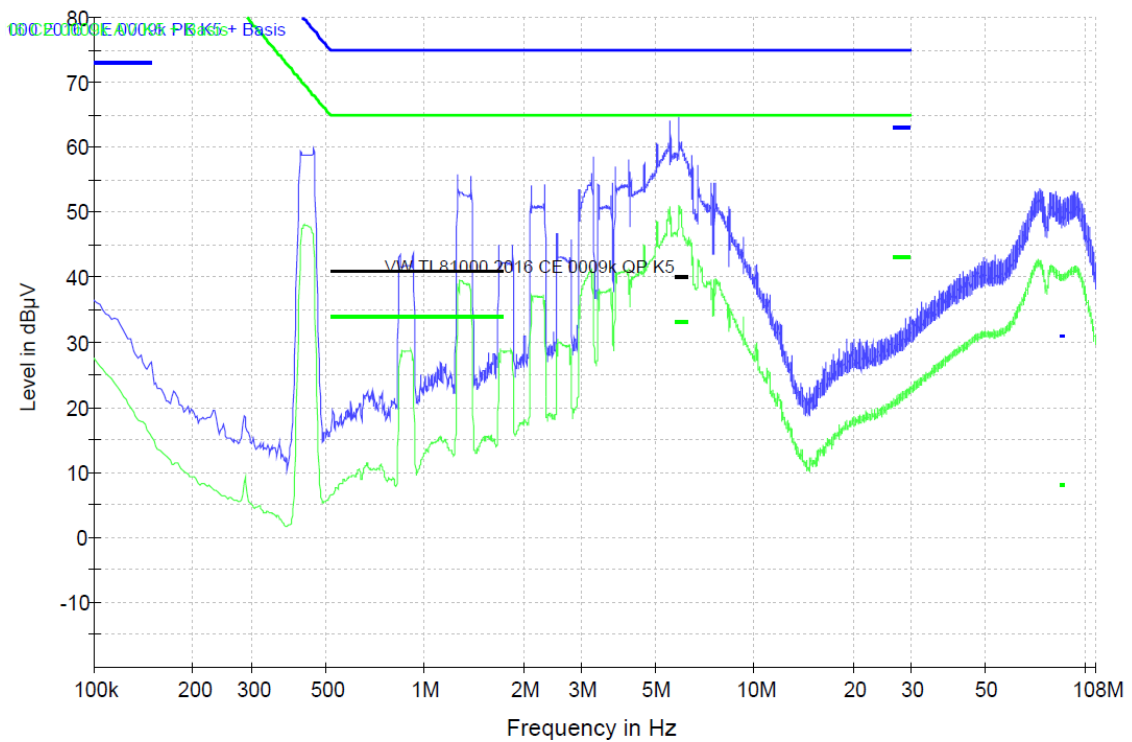
Tabulka 6.2 Základní limity pro CE dané normou TL-81000

Test no.	Service or band	Frequency in MHz	PK			QP			AV		
			Limit V in dB(μV)		BW f in kHz	Limit V in dB(μV)		BW f in kHz	Limit V in dB(μV)		BW f in kHz
			Class			Class			Class		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5
Base limits											
B1		0.15 to 0.52	107 - 59.51 × log(f/0.15) ^{a)}		9/10	-		-	97 - 59.51 × log(f/0.15) ^{a)}		9/10
B2		0.52 to 30	75		9/10	-		-	65		9/10
B3		30 to 108	65		120	-		-	55		120

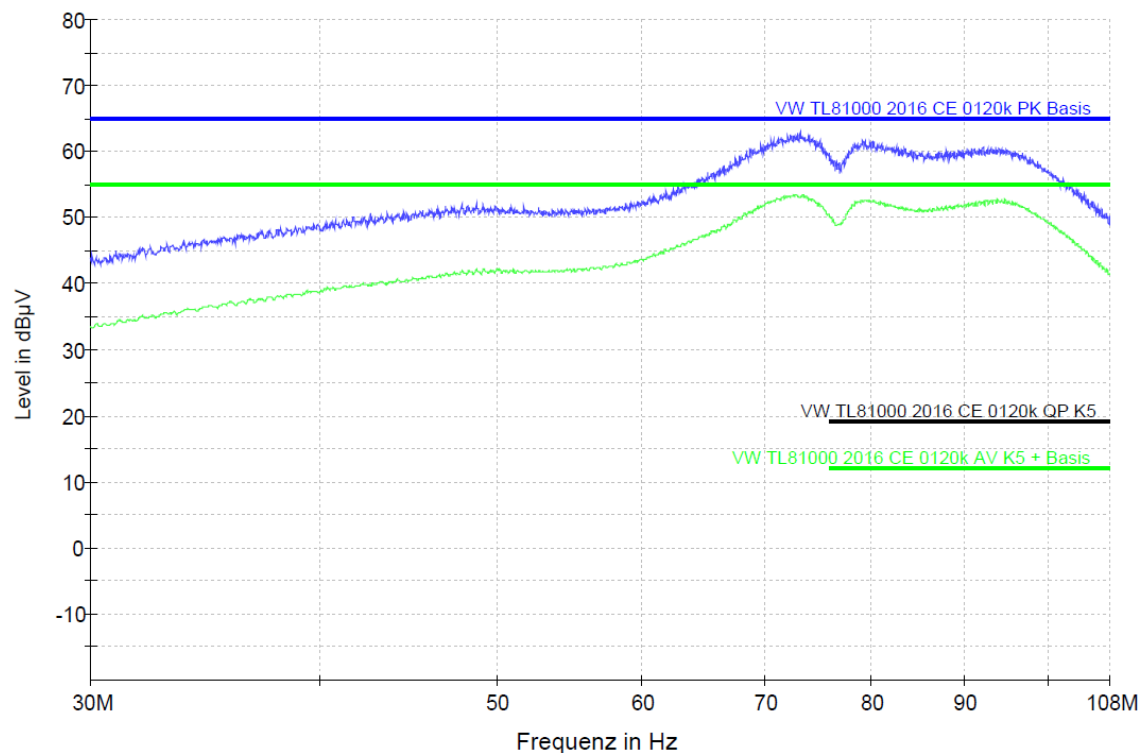
Měření proběhlo jak pro rušení generované do kladné vstupní svorky – to je vidět na obrázcích č. 6.41 a 6.42, tak pro rušení generované do záporné vstupní svorky – to je vidět na obrázcích č. 6.43 a 6.44.



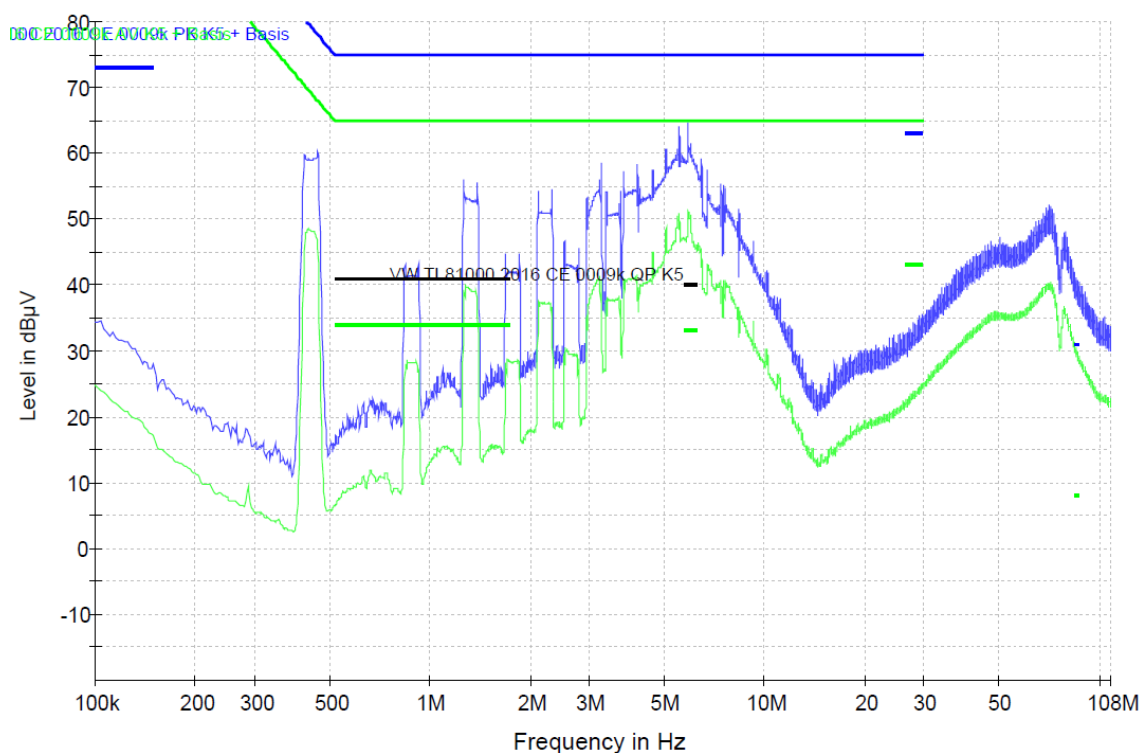
Obrázek 6.40 Zapojení pro měření rušení generovaného do vodiče



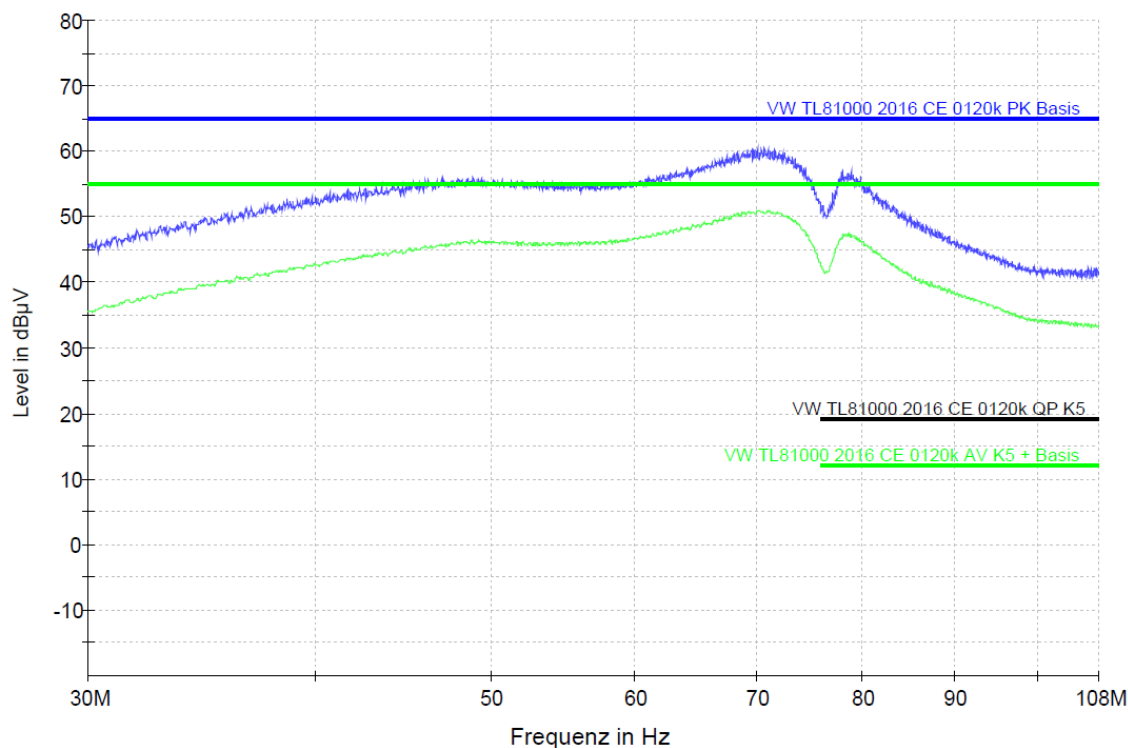
Obrázek 6.41 Měření rušení do vodiče na kladné vstupní svorce v rozsahu 100 kHz – 30 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná úroveň



Obrázek 6.42 Měření rušení do vodiče na kladné vstupní svorce v rozsahu 30 MHz – 108 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná úroveň



Obrázek 6.43 Měření rušení do vodiče na záporné vstupní svorce v rozsahu 100 kHz – 30 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná úroveň



Obrázek 6.44 Měření rušení do vodiče na záporné vstupní svorce v rozsahu 30 MHz – 108 MHz, modře je znázorněna špičková úroveň elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná úroveň

Z výsledků je patrné, že rušení se příliš neliší, pokud se jedná o rozdíl mezi rušením do vodiče ze záporné nebo kladné vstupní svorky. Je vidět, že zařízení plní

základní limity, které jsou v obrázcích znázorněny v horní části rovnými čarami. Níže jsou zobrazeny také rovné čáry, které znázorňují limity požadované zákazníky. Ty nebylo zapotřebí splnit.

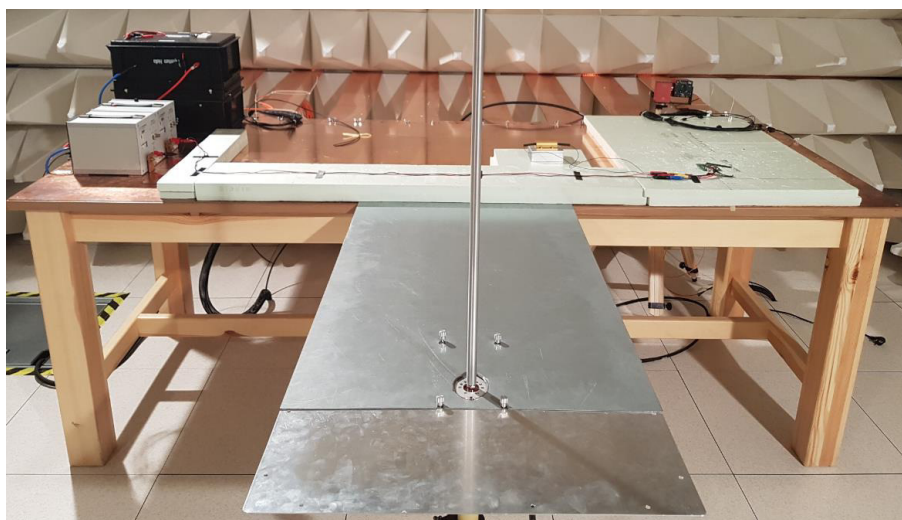
6.4.2 Rušení generované do okolí

Bylo otestováno, zda zařízení splňuje základní limity dané normou TL-81000, které můžeme vidět v tabulce č. 6.3.

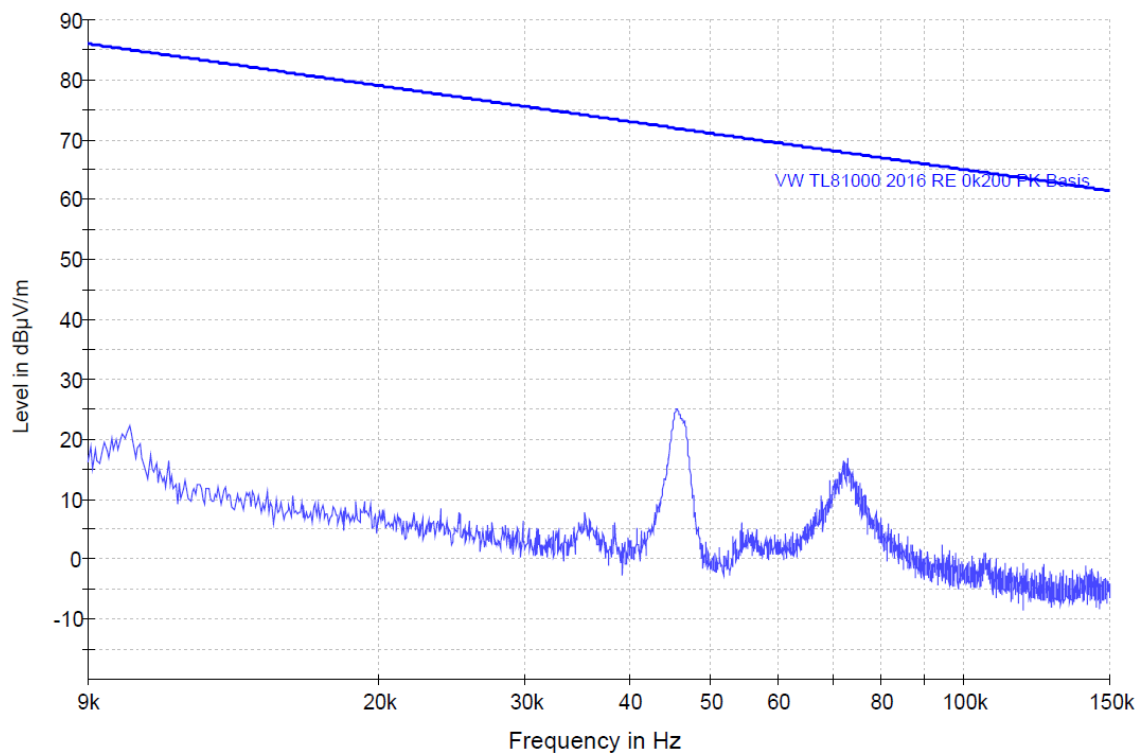
Tabulka 6.3 Základní limity pro RE dané normou TL-81000

Test no.	Service or band	Frequency in MHz	PK			QP			AV		
			Limit			Limit			Limit		
			E in dB(μV/m)			E in dB(μV/m)			E in dB(μV/m)		
			Class			Class			Class		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5
Base limits											
B4		0.009 to 0.15	86 - 20 × $\log(f/0.009)^a$			0.2	-	-	-	-	-
B5		0.15 to 5.35	62			9/10	-	-	-	-	-
B6		5.35 to 20	62 - 40 × $\log(f/5.35)^a$			9/10	-	-	-	-	-
B7		20 to 30	39			9/10	-	-	-	-	-
B8		30 to 75	62 - 25.13 × $\log(f/30)^a$			120	-	-	52 - 25.13 × $(\log(f/30))^a$	-	120
B9		75 to 400	52 + 15.13 × $\log(f/75)^a$			120	-	-	42 + 15.13 × $(\log(f/75))^a$	-	120
B10		400 to 1 000	63			120	-	-	53	-	120

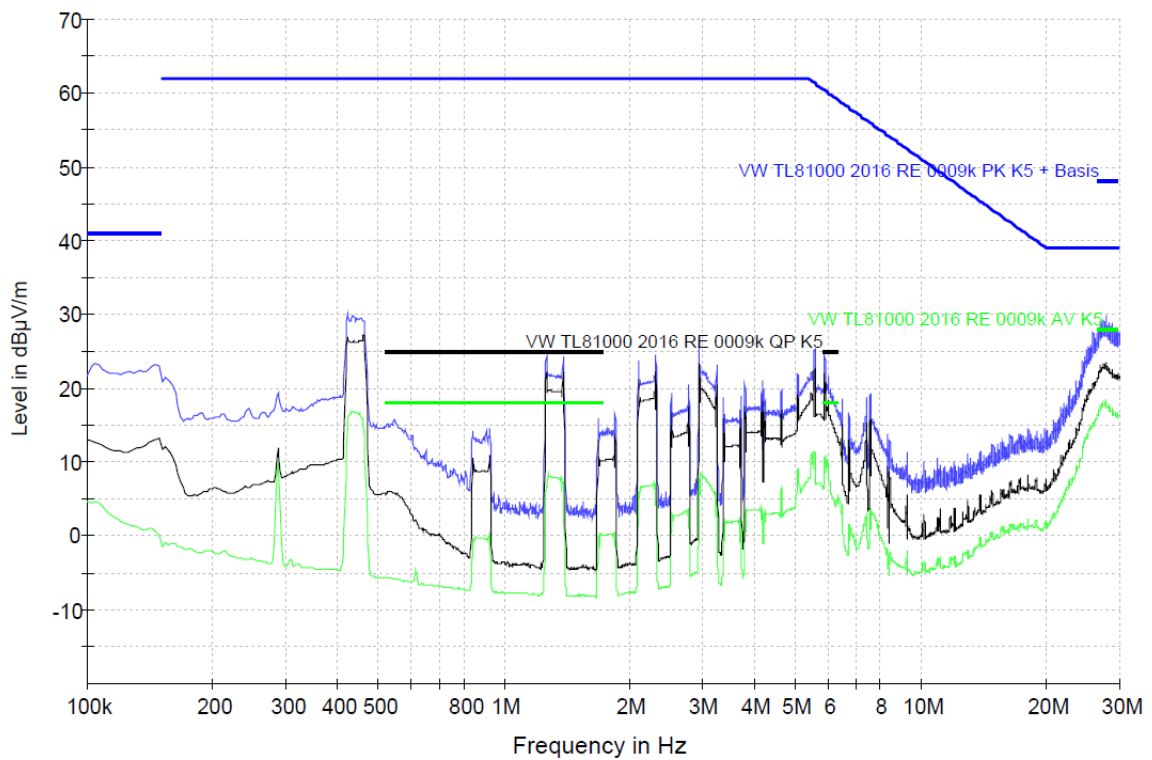
Pro měření na frekvencích od 9 kHz do 30 MHz byla použita prutová anténa. Nastavení měření je zobrazeno na obrázku č. 6.45. Výsledky měření můžeme vidět na obrázcích č. 6.46 a 6.47.



Obrázek 6.45 Nastavení měřicího stanoviště pro měření s prutovou



Obrázek 6.46 Měření rušení do okolí v rozsahu 9 kHz – 150 kHz, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity



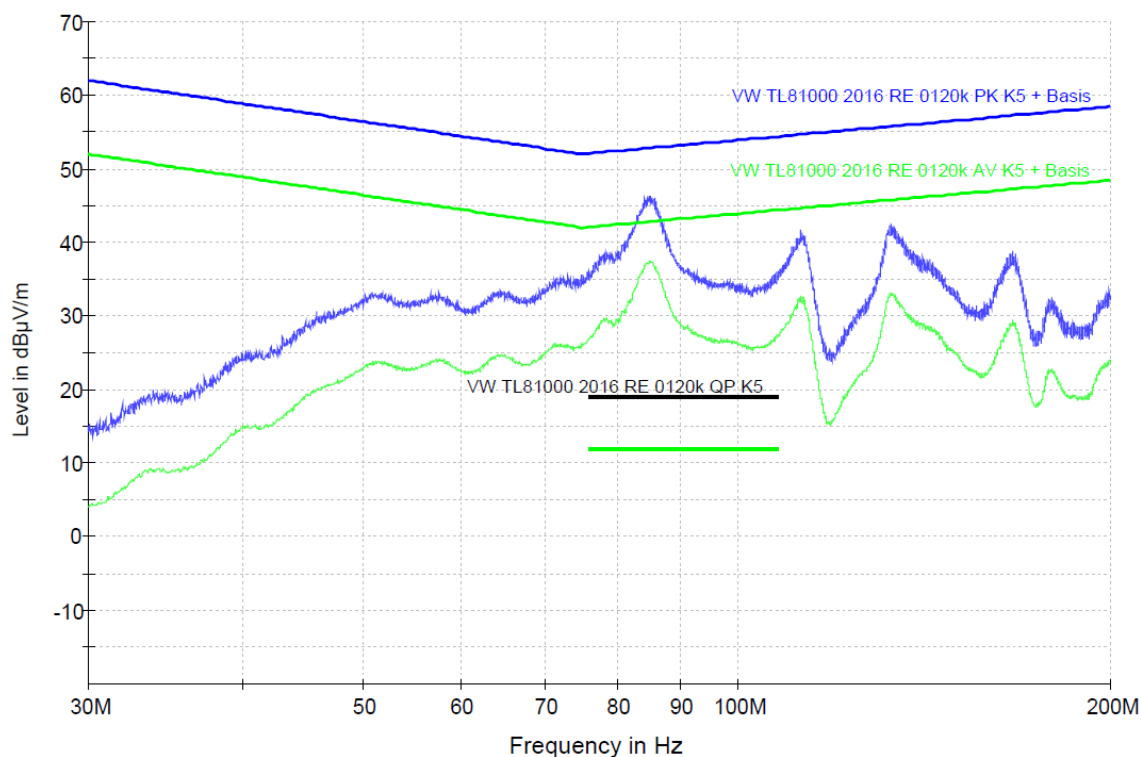
Obrázek 6.47 Měření rušení do okolí v rozsahu 100 kHz – 30 MHz, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity, černě kvazišpičková hodnota elektrické intenzity

Z naměřených hodnot nás zajímají pouze špičkové hodnoty elektrické intenzity, protože v rozsahu 9 kHz – 30 MHz pro průměrné a kvazišpičkové hodnoty elektrické intenzity žádné základní limity požadované nejsou. Objevují se tu opět pouze zákaznické limity, které nejsou předmět měření.

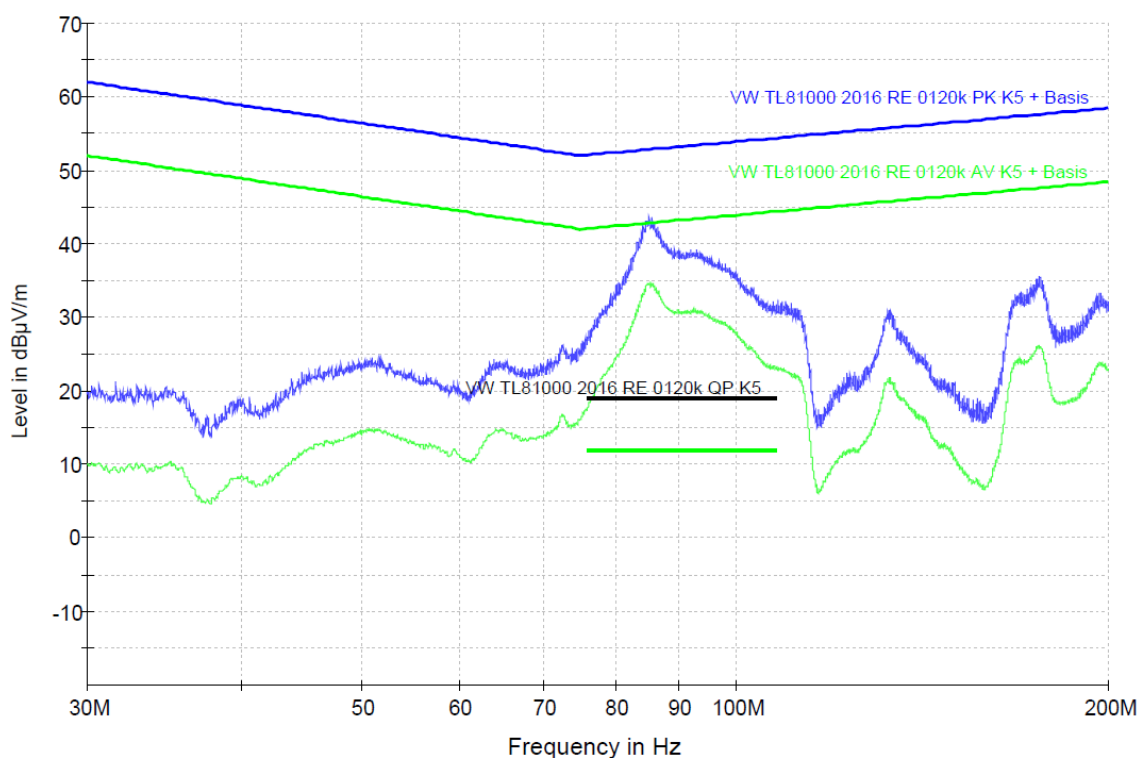
Pro měření na frekvencích od 30 MHz do 200 MHz byla použita biconická anténa. Nastavení měření je zobrazeno na obrázku č. 6.48. V tomto měření bylo změřeno vyzařování jak v horizontální poloze antény, tak v její vertikální poloze. Výsledky měření můžeme vidět na obrázcích č. 6.49 a 6.50.



Obrázek 6.48 Nastavení měřicího stanoviště pro měření s biconickou anténou

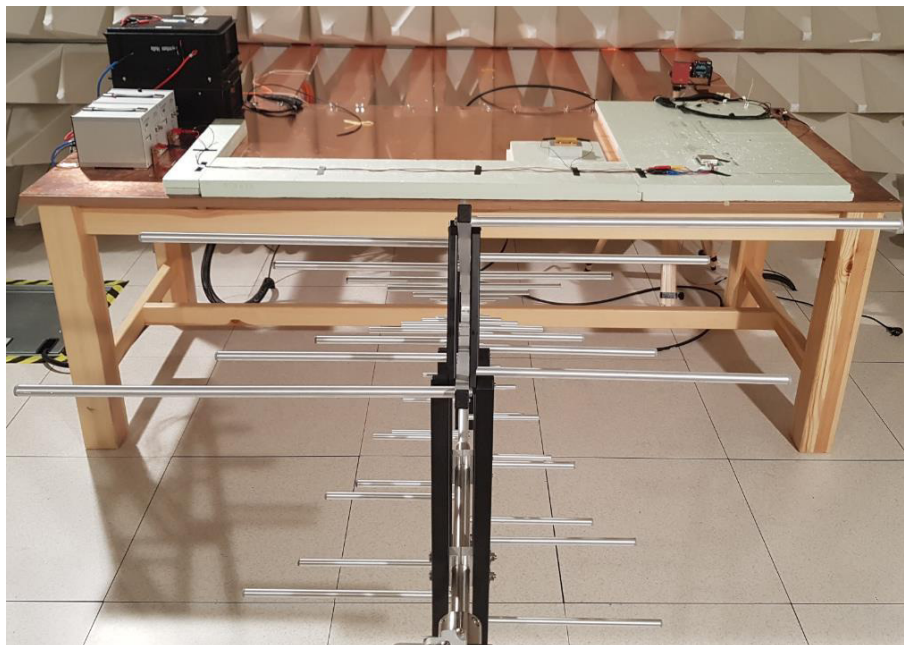


Obrázek 6.49 Měření rušení do okolí v rozsahu 30 MHz – 200 MHz v horizontální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity

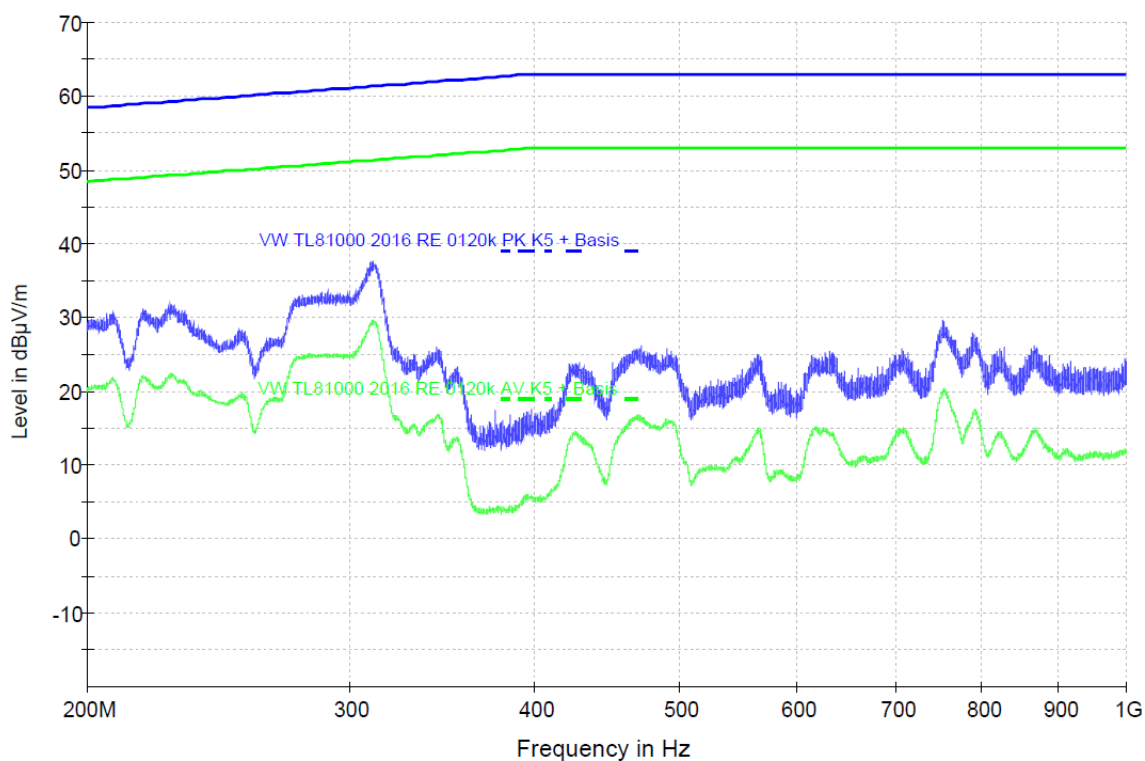


Obrázek 6.50 Měření rušení do okolí v rozsahu 30 MHz – 200 MHz ve vertikální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity

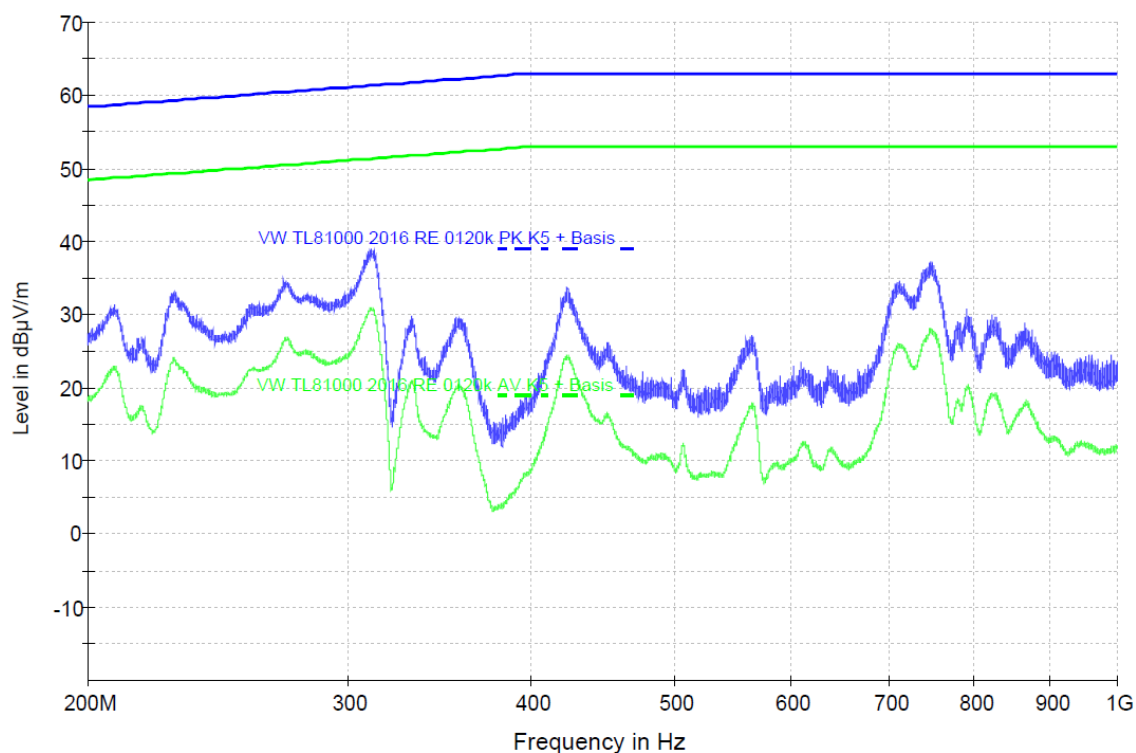
V rozsahu frekvencí 200 MHz – 1 GHz byla použita logaritmicko-periodická anténa. Nastavení měření je zobrazeno na obrázku č. 6.51. V tomto měření bylo změřeno vyzařování jak v horizontální poloze antény, tak v její vertikální poloze. Výsledky měření můžeme vidět na obrázcích č. 6.52 a 6.53.



Obrázek 6.51 Nastavení měřicího stanoviště pro měření s logaritmicko-periodickou anténou



Obrázek 6.52 Měření rušení do okolí v rozsahu 200 MHz – 1 GHz v horizontální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity



Obrázek 6.53 Měření rušení do okolí v rozsahu 200 MHz – 1 GHz ve vertikální poloze antény, modře je znázorněna špičková hodnota elektrické intenzity, zeleně je znázorněna průměrná hodnota elektrické intenzity

Na naměřených výsledcích je vidět, že testované zařízení v celém rozsahu 9 kHz – 1 GHz splňuje základní limity dané normou TL-81000.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout synchronní snižující měnič pro použití v automobilovém osvětlení, který bude splňovat požadované normy.

V první části byl proveden lehký rozbor teorie DC/DC měničů, základního rozdělení a funkcí jednotlivých topologií. Druhá část byla zaměřena na výběr vhodného integrovaného obvodu, na kterém bude měnič navrhnout. Důraz byl kladen na výkonovou zatížitelnost a minimální pokles výstupního napětí. Ve třetí části byl vypracován návrh pro integrovaný obvod vybraný na základě porovnání z předchozí kapitoly. Ve čtvrté části byly provedeny simulace navrženého obvodu. V páté části byl popsán návrh desky plošných spojů a její následné oživení. V poslední části bylo zařízení podrobeno měření. Byly změřeny základní charakteristiky, funkčnost zařízení v celém požadovaném rozsahu. Byly také provedeny vybrané testy inspirované normou. Proběhlo měření teplotních poměrů a emisí rušivých signálů jak do napájecího vodiče, tak do okolí.

Simulací byla odhadnuta hodnota účinnosti měniče přes 95 %. Reálná účinnost byla nižší, ale i tak se pro předpokládané pracovní podmínky (9 – 16 V vstupního napětí, 1 – 1,5 A výstupní proud) pohybuje nad hodnotou 90 %. Co se týče zvlnění výstupního napětí, tak simulace ukazuje zvlnění do 5 mV. To je příliš malá hodnota na to, že výstupní kapacita byla navržena na hodnotu zvlnění 1 %, tedy 60 mV. Reálné zvlnění výstupního napětí dosahovalo hodnoty přes 100 mV. Na výstupu jsou umístěny kondenzátory na 10 V. Při napětí 6 V je jejich kapacita výrazně menší, proto zvlnění dosahuje vyšších hodnot, než se předpokládalo. Tato hodnota by se dala zmenšit zvýšením kapacity výstupních kondenzátorů nebo použitím kondenzátorů s kapacitou 47 μ F při 6 V. Co se týče skokových změn na zátěži, či na vstupu, u simulace docházelo k mírným zákmitům, stejně tak jako tomu bylo při měření. U měření byly tyto zákmity mírně větší, a delší dobu trvalo ustálení. Tyto zákmity poukazují na nedostatečnou fázovou rezervu ve zpětné vazbě.

Výsledkem práce je měnič, který funguje. Výstupní napětí je trochu menší než 6 V. To je způsobeno výrobními tolerancemi odporů ve zpětné vazbě, popřípadě tolerancí referenčního napětí. Naměřená účinnost je dostačující. Měnič prošel vybranými testy z normy VW80000 a splnil základní limity, co se týče vyzařování rušení do vodiče a do okolí, definované normou TL81000.

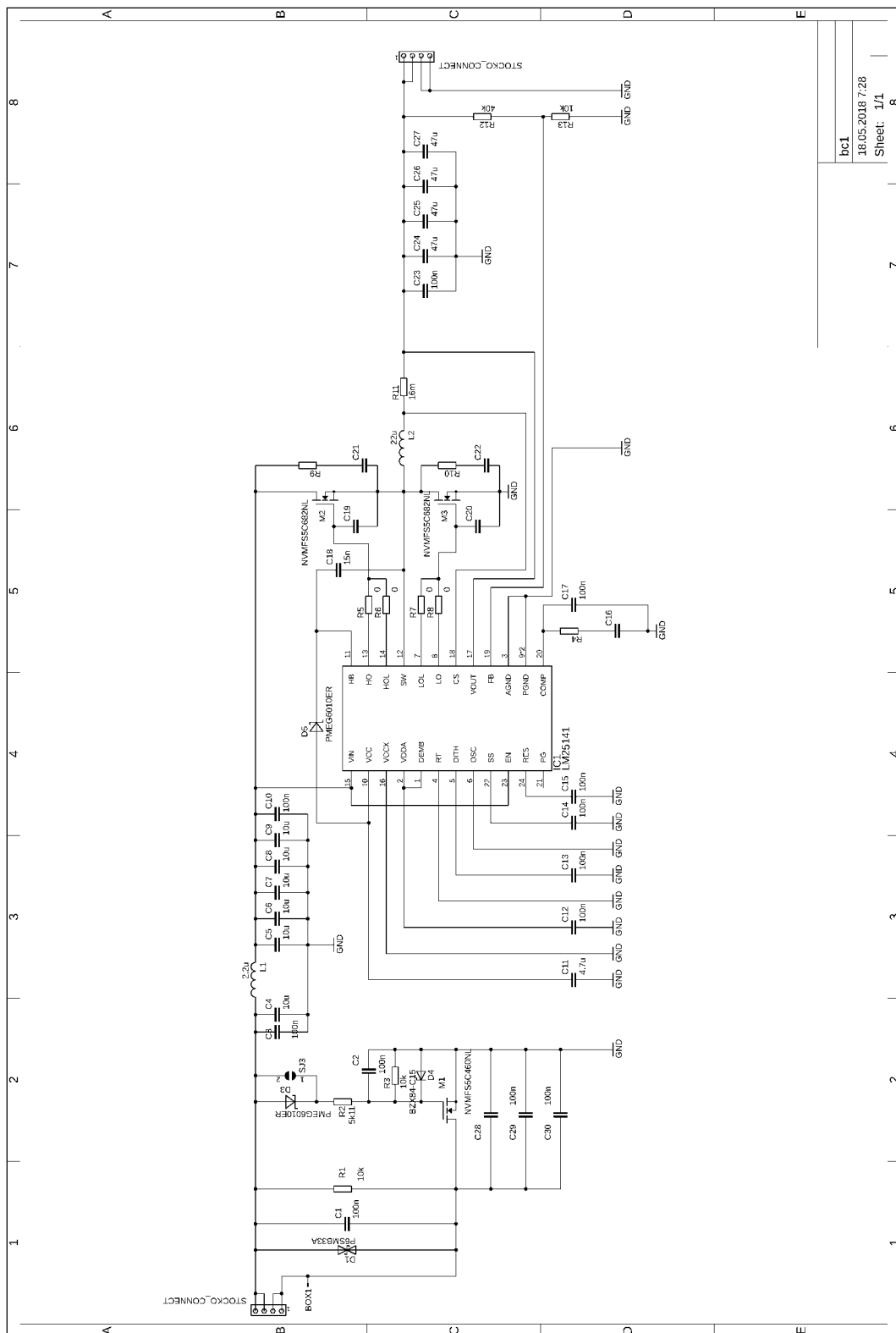
V rámci optimalizace by bylo vhodné doladit kompenzační pole. V testech, během kterých se pracovalo se skokovou změnou proudu v zátěži, či napětí na vstupu bylo možné pozorovat mírné zákmity, které jsou pravděpodobně způsobeny mírnou nestabilitou zpětné vazby. Bylo by tedy vhodné změřit Bohdeho diagram a podle toho osadit další součástky do kompenzačního pole.

Pokud by bylo zapotřebí, aby zařízení plnilo i přísnější zákaznické normy, co se týče vyzařování rušení, bylo by nutné upravit návrh a desku plošných spojů. Mezi možnostmi zlepšení se nabízí změna kapacit mezi vnitřní zemí a vnější zemí s tuner boxem, zapojení snubberů mezi drain a source u spínacích MOSFETŮ. Při návrhu byl brán ohled především na hlavní smyčku rušivých proudů, proto by bylo vhodné zkrátit i ty ostatní. Pravděpodobně by také pomohla úprava propojení rezistoru snímacího proud na cívce a integrovaného obvodu.

LITERATURA

- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. DC/DC měniče. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001. 112 s. ISBN 80-7300-045-8.
- [2] LENK, Ron. Practical design of power supplies. Piscataway, NJ: Wiley Interscience, c2005. ISBN 047175045X.
- [3] Katalogový list LM25141-Q1. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/LM25141-Q1>
- [4] Katalogový list LMR23630-Q1. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/LMR23630-Q1>
- [5] Katalogový list LM43603-Q1. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/LM43603-Q1>
- [6] Katalogový list NCV8851-1. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=NCV8851-1>
- [7] Katalogový list NVMFS5C682NL. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/NVMFS5C682NL-D.PDF>
- [8] Katalogový list NVMFS5C670NL. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/NVMFS5C670NL-D.PDF>
- [9] Designing Ultrafast Loop Response With Type-III Compensation for Current Mode Step-Down Converters. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva352a/slva352a.pdf>
- [10] BOUZEK, O. *Návrh a konstrukce řídicí jednotky pro vysoce svítivé LED diody*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, 2013. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Jaroslav Freisleben.
- [11] Katalogový list P6SMB. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/tvs_diodes/littelfuse_tvs_diode_p6smb_datasheet.pdf.pdf

A SCHÉMA ZAPOJENÍ



B SEZNAM SOUČÁSTEK

Ozn.	Hodnota	Pouzdro	Výrobce	Označení
IC1		VQFN-24	TI	LM25141-Q1
M1		DFN5	ON Semi	NVMFS5C460NL
M2		DFN5	ON Semi	NVMFS5C682NL
M3		DFN5	ON Semi	NVMFS5C682NL
L1	2,2 μ H	2525	Vishay	IHLP2525CZER2R2M01
L2	22 μ H		Bourns	SRP1038A-220M
D1		SMB	Vishay	P6SMB33A
D3		SOD123W	Nexperia	PMEG6010ER
D4		SOT23	Nexperia	BZX84-C15
D5		SOD123W	Nexperia	PMEG6010ER
C1	100 nF/50 V	0805		
C2	100 nF/50 V	0805		
C3	100 nF/50 V	0805		neosazeno
C4	10 μ F/50 V	1210	TDK	C3225X7S1H106K250AB
C5	10 μ F/50 V	1210	TDK	C3225X7S1H106K250AB
C6	10 μ F/50 V	1210	TDK	C3225X7S1H106K250AB
C7	10 μ F/50 V	1210	TDK	C3225X7S1H106K250AB
C8	10 μ F/50 V	1210	TDK	C3225X7S1H106K250AB
C9	10 μ F/50 V	1210	TDK	C3225X7S1H106K250AB
C10	100 nF/50 V	0805		neosazeno
C11	4.7 μ F/10 V	0805		
C12	100 nF/50 V	0603		
C13	100 nF/50 V	0603		
C14	100 nF/50 V	0603		
C15	100 nF/50 V	0603		
C16		0603		neosazeno
C18	100 nF/50 V	0603		
C19	330 pF/50 V	0603		neosazeno
C20	330 pF/50 V	0603		neosazeno
C21	330 pF/50 V	0603		neosazeno

C22	330 pF	0603		neosazeno
C23	100 nF	0805		neosazeno
C24	47 μ F/10V	1210	Murata	GRM32ER71A476ME15L
C25	47 μ F/10V	1210	Murata	GRM32ER71A476ME15L
C26	47 μ F/10V	1210	Murata	GRM32ER71A476ME15L
C27	47 μ F/10V	1210	Murata	GRM32ER71A476ME15L
C28	100 nF/50 V	0805		neosazeno
C29	100 nF/50 V	0805		neosazeno
C30	100 nF/50 V	0805		neosazeno
R1	10 k Ω	0805		
R2	5,11 k Ω	0805		
R3	10 k Ω	0603		
R4		0603		neosazeno
R5	0 Ω	0603		
R6	0 Ω	0603		
R7	0 Ω	0603		
R8	0 Ω	0603		
R9	4,75 Ω	0603		neosazeno
R10	4,75 Ω	0603		neosazeno
R11	16 m Ω	0805	ROHM	UCR10EVHFSR016
R12	40 k Ω	0603		
R13	10 k Ω	0603		